ELETRÔNICA RÁDIO E TV

SUMÁRIO

INSTITUTO UNIVERSAL BRASILEIRO

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV
14ª LIÇÃO TEÓRICA
PRINCÍPIOS DE TRANSMISSÃO E AMPLIFICAÇÃO DE RF

Introdução

Na lição anterior, foram apresentadas algumas noções elementares sobre os fenômenos ondulatórios (oscilações) e os circuitos mais empregados na formação de ondas. Com isto, o aluno está em condições de entender os princípios da radiotransmissão - formação e propagação das ondas de rádio - sobre os quais assentam os maravilhosos engenhos de nossa era, como o rádio, televisão, etc.

Neste capítulo, vamos falar sobre a formação das ondas de rádio e sobre a anormalidade de sua propagação. Comecemos mostrando como se forma uma onda eletromagnética.

I - Onda eletromagnética

Como o próprio nome sugere, a onda eletromagnética nada mais é que um campo elétrico e magnético que se propaga no espaço.

Sabemos que a corrente elétrica, ao percorrer um condutor, forma ao redor dele um campo magnético, cujas linhas de força são concêntricas com o eixo do condutor. Se a corrente for variável, o campo também será e, se colocarmos um outro condutor na região ativa do campo, nele se induzirá uma corrente com as mesmas variações que a corrente produtora do campo.

À região onde ocorrem fenômenos elétricos e magnéticos chamamos **campo eletromagnético**.

Observe o aluno que, se tivéssemos exclusivamente carga elétrica, em volta dela existiria só campo elétrico. Se tivéssemos somente carga magnética (ímã), ao redor dela existiria só campo magnético.

Como temos um campo elétrico variável, devido ao movimento das cargas elétricas no interior do condutor, surge um campo magnético também variável.

Há, portanto, duas relações fundamentais entre campo elétrico e magnético, que são:

1ª) A variação do campo elétrico corresponde a existência do campo magnético.

2ª) A variação do campo magnético corresponde a existência do campo elétrico.

Essas duas relações vinculam (prendem) um campo ao outro, ou seja, a existência de um campo elétrico variável implica na existência de um campo magnético variável, e vice-versa.

a) Formação da onda eletromagnética

A formação da onda eletromagnética, ou seja, da propagação do campo eletromagnético, é um fenômeno bastante complicado. Entretanto, vamos descrevê-lo de maneira breve, simplificando ao máximo as explicações, apenas para que o aluno tenha uma idéia qualitativa do fenômeno. Para isso, suponhamos um condutor retilíneo percorrido por uma corrente variável de alta freqüência. Sabemos que, num plano perpendicular cortando esse condutor, aparecerá um campo magnético, cujas linhas de força são concêntricas com o condutor, como mostramos na **figura 1**, em tracejado. A existência desse campo magnético num ponto muito próximo do condutor faz aparecer agora, um campo elétrico, situado num plano perpendicular ao magnético, como indicamos na figura 1, em traços cheios. O campo elétrico em O_1, sendo igual ao de O e de sinal contrário, anula-o, aparecendo outro em O_2, que depois será anulado pelo de O_3, e assim por diante. Deste modo, os **campos elétrico e magnético produzidos em O propagam-se no espaço**, mutuamente entrelaçados. A esse fenômeno dá-se o nome de **onda eletromagnética**.

Figura 1 - Propagação dos campos elétricos e magnéticos.

A velocidade de propagação da onda eletromagnética é igual à da luz, ou seja, cerca de 300 000 quilômetros por segundo, em todas as direções.

b) Intensidade do campo eletromagnético

À medida que a onda eletromagnética se distancia do ponto de origem, vai se enfraquecendo em virtude das perdas que sofre devido à densidade do meio de propagação. Geralmente, os corpos bons condutores de eletricidade refletem a onda sem absorvê-la e os maus condutores a absorvem, refletindo-a muito pouco. Isso tem grande influência na propagação das ondas de rádio, que são eletromagnéticas, como mostraremos logo mais.

A intensidade do campo magnético em um ponto do espaço é medida em **Volts por metro de altura**. Adota-se como referência de medida a superfície da Terra. Assim, pode-se medir a intensidade do campo eletromagnético, colocando-se uma placa metálica à distância de um metro do solo e lendo-se a tensão (diferença de potencial) entre essa placa e o solo, como mostramos na **figura 2**. Como essas tensões são geralmente pequenas, costumam ser dadas em microvolts por metro.

Figura 2 - Medição de intensidade de um campo.

II - Ondas de rádio

A energia que um transmissor de rádio aplica ao elemento irradiador, que é a antena, estabelece, em volta da mesma, um campo eletromagnético variável. Este se desloca no espaço (antigamente chamado éter) com velocidade muito grande, ou seja, aproximadamente 300 000 Km por segundo, que corresponde à velocidade da luz. Essa velocidade é tão grande que uma onda de rádio daria sete voltas e meia ao redor da Terra, em um segundo.

Sendo constante a velocidade de propagação da onda, podemos deduzir as duas características fundamentais, que são: a **freqüência** e o **comprimento da onda**. Realmente, em aula anterior, vimos que se pode calcular a velocidade de uma onda, dividindo o espaço que ela

percorre, pelo tempo empregado em percorrê-lo. Particularmente, pode-se considerar o espaço como **um comprimento de onda**. Sabe-se que, neste caso, o tempo corresponderá a **um período**; portanto,

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

onde **v** representa a velocidade, λ (lâmbda) o comprimento de onda e **T**, o período. Lembrando que o período é o inverso da freqüência, podemos escrever:

$$v = \lambda . f$$

que é a igualdade que relaciona velocidade, comprimento de onda e freqüência. Mas, no caso das ondas eletromagnéticas, **v** é a velocidade da luz, que é igual a 300 000 Km/seg ou 300 000 000 de metros por segundo. Logo, podemos escrever:

$$\lambda . f = 300\,000\,000 \text{ m/seg}$$

Dessa expressão, resulta:

$$\lambda = \frac{300\,000\,000 \text{ m/seg}}{f_{(Hz)}}$$

que dará o comprimento de onda em metros, se **f** for contado em Hertz e

$$f = \frac{300\,000\,000 \text{ m/seg}}{\lambda_{(m)}}$$

que dará **f** em Hertz, se λ for considerado em metros.

Por exemplo, vamos calcular o comprimento de onda de uma emissora que opera na freqüência de 1 MHz.

Teremos:

1 MHz = 1 000 000 Hz

donde:

$$\lambda = \frac{300\,000\,000 \text{ m/s}}{1\,000\,000 \text{ Hz}} = 300 \text{ m}$$

Como outro exemplo, vamos determinar a freqüência de uma emissora de onda curta, que opera em 25 metros.

Teremos:

$$f = \frac{300\,000\,000 \text{ (m/s)}}{25 \text{(m)}} = 12\,000\,000 \text{ Hz ou } 12 \text{ MHz}$$

Certamente, o aluno já está acostumado a ouvir, em seu receptor de rádio, o locutor mencionar a freqüência e o comprimento de onda de sua emissora. Essas características identificam a estação; e facilitam ao usuário a sua localização sobre uma escala graduada, que chamamos de "dial".

As freqüências das estações de rádio e, conseqüentemente, os comprimentos de onda, se estendem por uma escala bem ampla, indo desde 3 KHz até 30 GHz, divididas em 7 faixas denominadas da forma como indicamos na **tabela I**.

Freqüência	Designação quanto a freqüência	Siglas	Comprimento de onda	Designação quanto ao comprimento de onda
3 a 30 KHz	Freq. muito baixas	VLF	100 Km a 10 Km	ondas muito longas
30 a 300 KHz	Freq. baixas	LF	10 Km a 1 Km	ondas longas
300 a 3000 KHz	Freq. médias	MF	1000 M a100 M	ondas médias
3 a 30 MHz	Freq. altas	HF	100 M a 10 M	ondas curtas
30 a 300 MHz	Freq. muito altas	VHF	10 M a 1 M	ondas muito curtas
300 a 3000 MHz	Freq. ultra-altas	UHF	100 cm a 10 cm	ondas ultracurtas
3 a 30 GHz	Freq. super-altas	SHF	10 cm a 1 cm	ondas supercurtas

TABELA I - Agrupamento das freqüências em faixas.

Como se nota, na primeira coluna indicamos o intervalo de freqüências; na segunda, a designação usual das freqüências; na terceira, as siglas da nomenclatura do intervalo de freqüências, em inglês. Assim, VLF é sigla de "**v**ery **l**ow **f**requency", HF é sigla de "**h**ight **f**requency", etc. "Very low frequency" significa freqüência muito baixa: "hight frequency" significa alta freqüência, etc. Na quarta coluna, indicamos os comprimentos de onda e, na quinta, a designação que o intervalo de onda recebe em relação ao comprimento de onda.

a) Propagação das ondas de rádio

1) A atmosfera terrestre

Para entender a maneira como se propagam as ondas de rádio, precisamos ter uma idéia clara da formação da **atmosfera terrestre**, ou seja, da massa gasosa que envolve nosso planeta.

O ar é composto de oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e os chamados gases nobres, como argônio, criptônio, xenônio, etc., sendo que os três inicialmente citados (oxigênio, hidrogênio e nitrogênio) se encontram em muito maior proporção que os demais.

Além disso, a distribuição do ar não é uniforme, pois na superfície da Terra o ar é mais denso que nas grandes altitudes, onde há uma distribuição dos gases em camadas. As camadas mais leves se distribuem em maiores altitudes. O aluno pode assemelhar a Terra a uma bola rodeada de várias "cascas", cada qual desempenhando papel diferente na propagação das ondas, como mostraremos logo mais.

O limite da atmosfera está fixado em cerca de 1 000 Km.

Na prática, chama-se de **troposfera** a camada mais baixa, ou seja, compreendida entre a superfície da Terra e até cerca de 15 Km de altitude e **ionosfera**, a camada que vai do limite da superfície da troposfera até cerca de 1 000 Km. A partir dos 1 000 Km **não há mais ar**.

A ionosfera está subdividida em 3 camadas, por nós denominadas D, E e F, cujos limites aproximados indicamos na **figura 3**.

O nome de ionosfera que se dá a camada que sucede a troposfera é devido ao fato de que nela o ar sofre influência
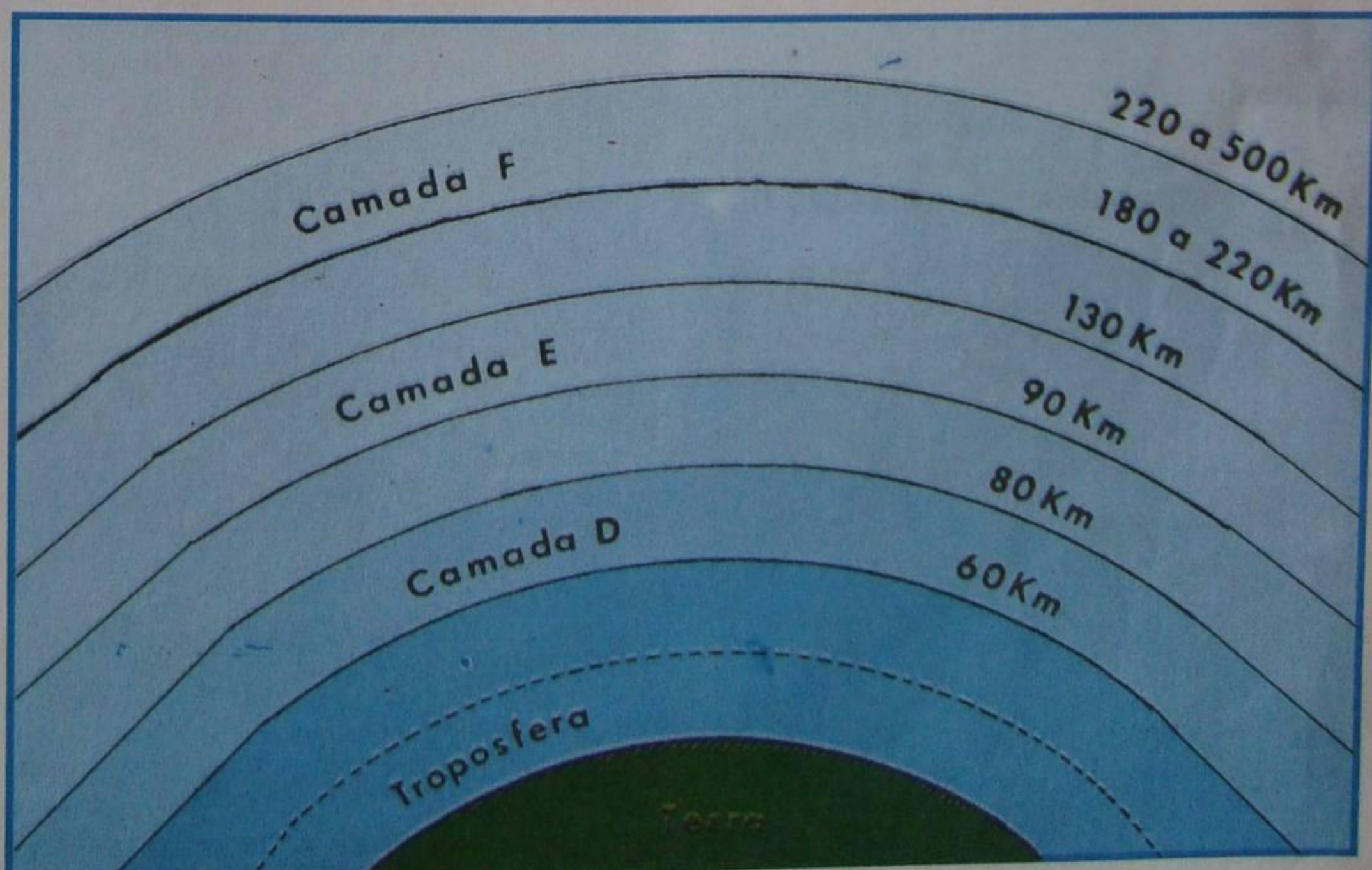
Figura 3 - Subdivisão da atmosfera.

de vários fatores, principalmente dos raios cósmicos e raios solares, **ionizando-se**, isto é, certos átomos dos gases perdem elétrons, que se transformam em elétrons livres, tornando-se **íons positivos** (átomo sem 1 ou mais elétrons).

É importante observar que essas camadas não são fixas. A camada D, por exemplo, só existe durante o dia. A camada F se subdivide em duas, durante o dia. Não existe, portanto, um limite bem estabelecido para as camadas. Além disso, a espessura das camadas e sua condutividade variam durante as 24 horas do dia, e também durante o ano, devido à atividade ionizadora dos raios solares, à tempestade magnética, causada por erupção de elétrons do Sol, à presença de meteoros que entram na atmosfera, etc., influenciando a propagação das ondas de rádio.

2) Perda de energia das ondas de rádio

Quando uma onda de rádio sai da antena do transmissor, ela tem a máxima energia. Essa onda se propaga em **todas** as direções e a sua energia vai diminuindo à medida que se **afasta** do transmissor. Além disso, a energia é também **absorvida** pelos obstáculos que se encontram no caminho da onda. As ondas que propagam na superfície terrestre são absorvidas pelas montanhas, florestas, linhas de transmissão de energia elétrica, etc. É interessante observar que **se a absorção é menor, conseqüentemente, o alcance da onda é maior**. É o que acontece, por exemplo, quando a onda tem a mesma direção que uma linha de transmissão ou trilhos de uma estrada de ferro. O contrário acontece, quando a direção da onda é **perpendicular** à superfície **boa condutora** ou **paralela** à superfície **má condutora**.

As camadas ionizadas da atmosfera também absorvem energia, em virtude de serem semicondutoras.

Nessas camadas, a onda de rádio pode sofrer **reflexão** ou **refração**.

Reflexão: Num meio homogêneo, isto é, que tem as mesmas propriedades físicas em todos os seus pontos, a onda de rádio se propaga em linha reta. Entretanto, quando ela atinge a superfície de separação de dois meios diferentes, ela sofre uma **reflexão** e uma **refração**. Estes fenômenos ocorrem quando as ondas atravessam as diversas camadas da ionosfera.

A **reflexão** consiste na **volta da onda**, fazendo um certo ângulo com a superfície de separação dos dois meios (camadas). É o que mostramos na **figura 4**.
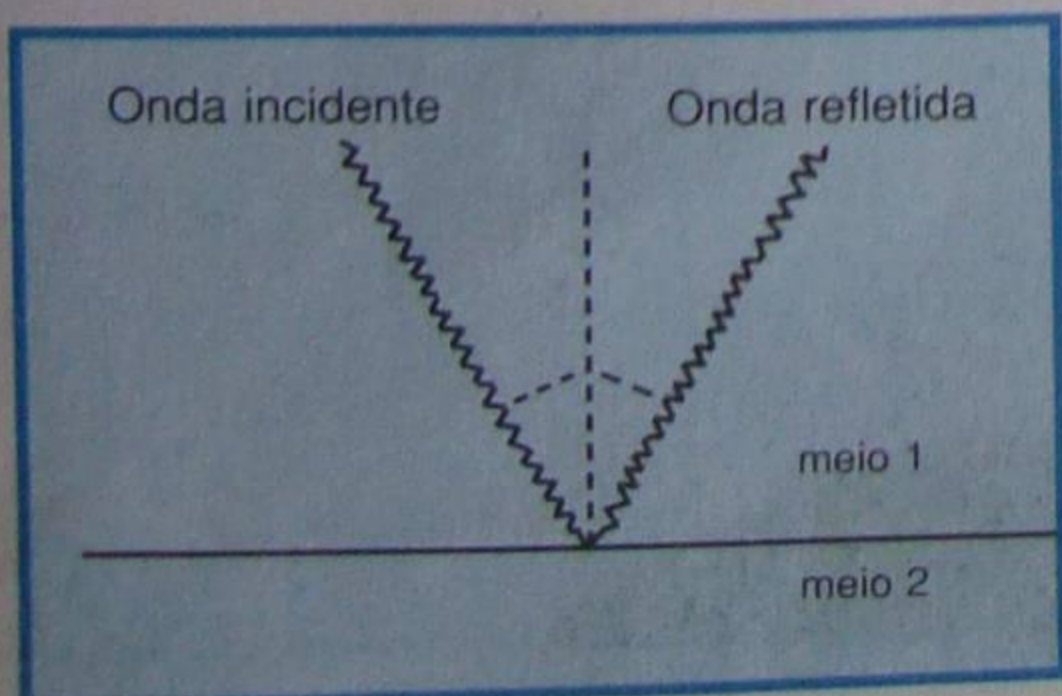
Figura 4 - Reflexão.
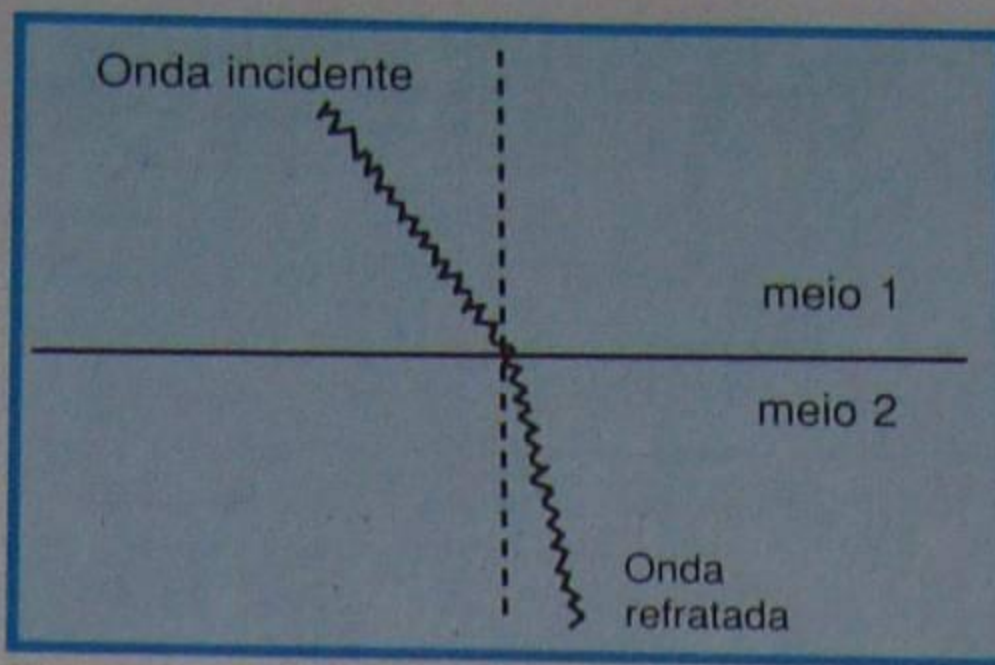
Figura 5 - Refração.

Refração: A refração consiste na **penetração** da onda no meio de propriedades diferentes, o que se dá com mudança de direção. Na **figura 5**, ilustramos a refração.

Esses fenômenos são facilmente observados na propagação das ondas de luz, que são também ondas eletromagnéticas semelhantes às de rádio. De fato, a reflexão dos raios luminosos pode ser observada no espelho, com muita facilidade. Quanto à refração, basta o aluno colocar uma haste qualquer inclinada (um lápis, por exemplo) dentro de um copo com água e notará que a haste parece ter a parte imersa dobrada, em relação à não imersa.

Para finalizar, acrescentamos que a onda de radio, quando atingir um meio condutor, será **parcialmente absorvida e refletida**. Quando atingir um dielétrico ou um mal condutor, será **absorvida, refletida e refratada**.

Difração: Outro fenômeno que acontece com as ondas de rádio é o da difração, que consiste na mudança de direção da onda (encurvamento), para contornar obstáculos que estejam em seu percurso.

Na **figura 6**, ilustramos a difração das ondas de rádio quando atingem uma montanha. Como a onda não segue exatamente o contorno do obstáculo, atrás dele haverá uma **zona de silêncio** para essa onda, ou seja, zona onde a recepção é nula ou quase nula. É claro que qualquer outra onda que chegue por esse lado terá sua zona de silêncio no lado oposto.

Essa capacidade de contornar os obstáculos depende do **comprimento** da onda e, quanto **maior** for ele, mais facilmente ela atingirá o outro lado.

3) Ondas terrestres e celestes

As ondas que se propagam na superfície da Terra são chamadas de **ondas terrestres**. Como mostramos, essas ondas são absorvidas pelos obstáculos que se encontram em seu percurso e particularmente pela terra, que é um bom meio condutor. Essas ondas são irradiadas **horizontalmente**.

As ondas que são irradiadas, fazendo ângulo com a superfície terrestre, ou seja, dirigidas para o céu, são denominadas de **ondas celestes**.

As ondas celestes atravessam a troposfera e atingem as camadas ionizadas da ionosfera. Nessas camadas elevadas vão sofrendo refrações e reflexões sucessivas e, devido à mudança de meios condutores, encurvam-se e voltam para a Terra. Na **figura 7**, mostramos ondas com freqüências distintas. A onda (1) é refletida pela camada **E** e volta para a Terra no ponto **A**. A onda (2) de freqüência mais elevada, penetra na camada **E**, sofre várias refrações e é refletida pela camada **F**, voltando para a Terra em um ponto **B**, mais distante do transmissor que **A**.

Finalmente, a onda (3) é de freqüência muito mais alta (e/ou inclinação mais acentuada), de modo que penetra na camada **F** e se perde no espaço interplanetário.

Como já foi afirmado, a posição das camadas não é fixa, ou seja, elas mudam de altitude freqüentemente. Além disso, a ionização, que depende grandemente dos raios solares, é diferente em cada época do ano. Isto explica a variação considerável da intensidade do sinal de uma emissora, durante o dia e à noite e, também, em determinada época do ano. Em outras palavras, freqüentemente uma emissora, que, durante o dia, chega muito mal, é bem recebida à noite. Por outro lado, em certas épocas do ano, essa emissora chega mal, inclusive à noite.

Outro efeito que se verifica devido à propagação irregular das ondas é o chamado **"fading"** ou **desvanecimento**.

O aluno que possui rádio certamente já observou, principalmente na recepção de emissoras distantes, que há uma flutuação na intensidade do sinal, que, às vezes, desaparece completamente, retornando logo após. É o chamado **"fading"**.

A causa do "fading" é a chegada, ao receptor, de diversas ondas emitidas pelo mesmo transmissor, mas que percorreram caminhos diferentes. Devido às constantes modificações das camadas da ionosfera, há variação na distância do percurso das ondas celestes até o receptor. Essas ondas chegam atrasadas em relação às ondas terrestres. Há, portanto, variação de fase. Quando as fases coincidem, as ondas se **somam** e o sinal torna-se mais intenso. Se as fases são opostas, as ondas se **subtraem**, podendo anular-se.

b) As faixas de onda

Na tabela I, apresentamos a divisão, em 7 faixas, do espectro eletromagnético das ondas de rádio. Entretanto, as ondas utilizadas nas emissões de rádio não correspondem integralmente a uma faixa; por isso, daremos em seguida os limites adotados para serviços de radiodifusão, e as características de propagação de cada faixa.

1) Ondas longas

São ondas cuja freqüência está entre 30 e 300 KHz (note que o comprimento de onda, segundo a tabela I, é de 1 a 10 km). Essa faixa não é utilizada no Brasil para o serviço de radiodifusão comercial, embora o seja na Europa. As ondas terrestres acompanham a curvatura da Terra com facilidade, em razão da baixa freqüência. Entretanto, como as ondas terrestres são muito absorvidas, os transmissores necessitam de potência
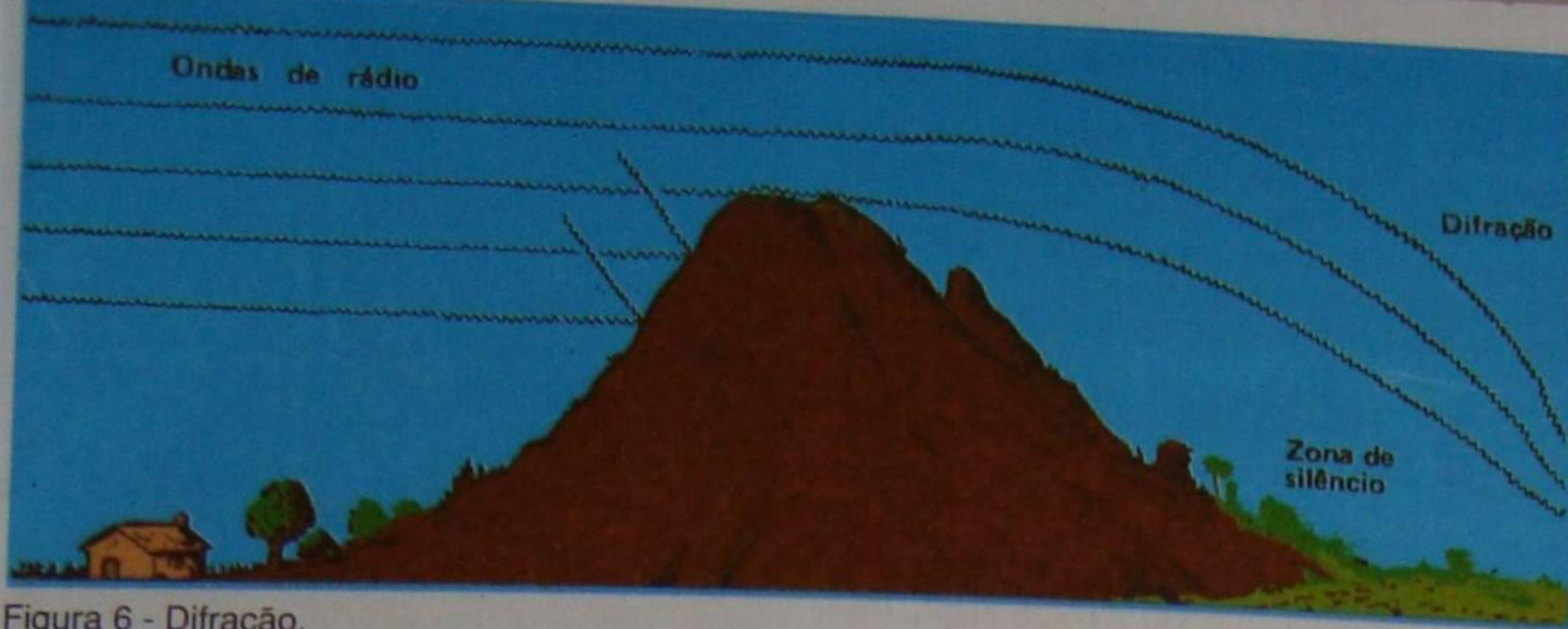
Figura 6 - Difração.
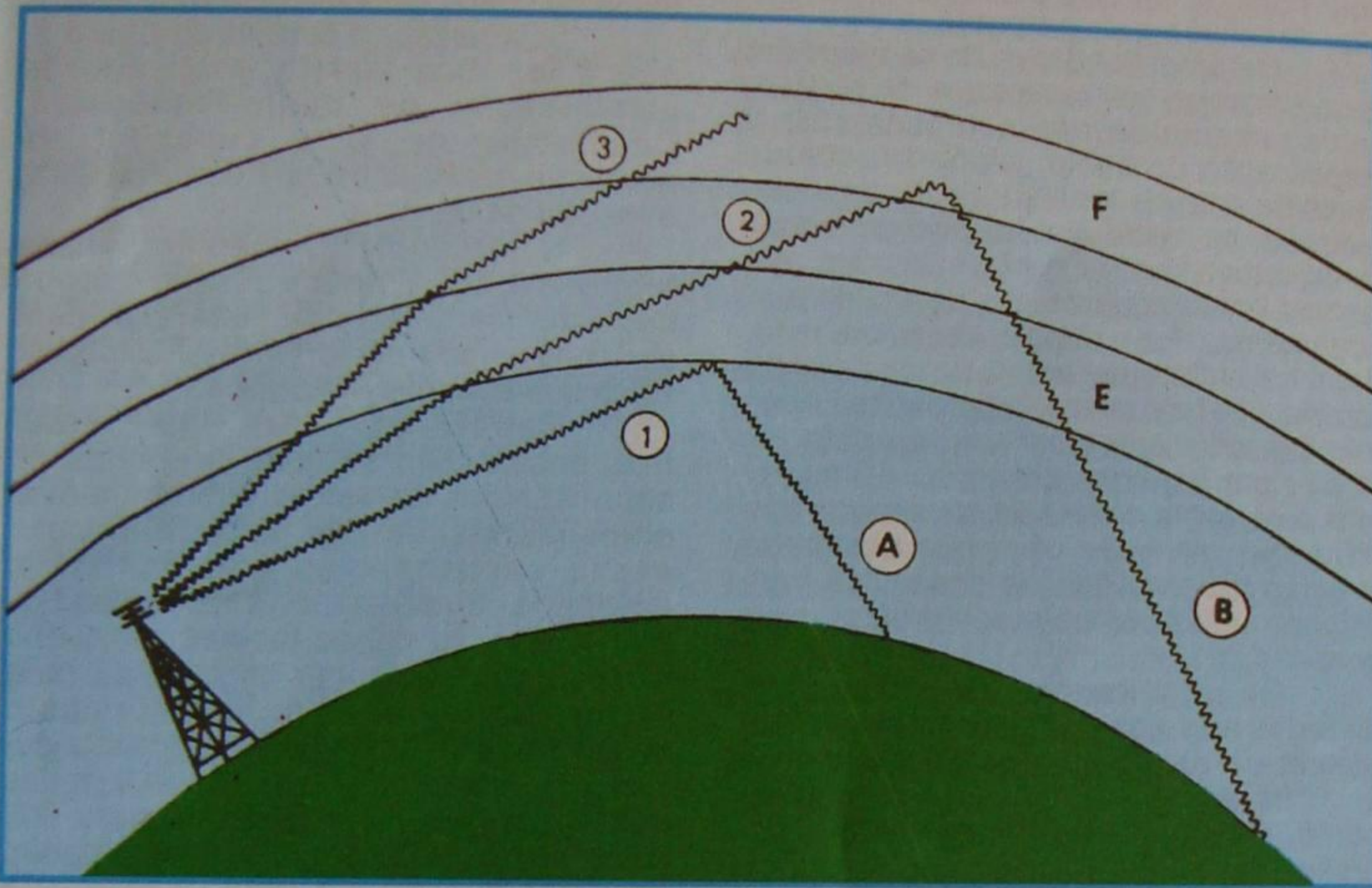
Figura 7 - Comportamento das ondas.
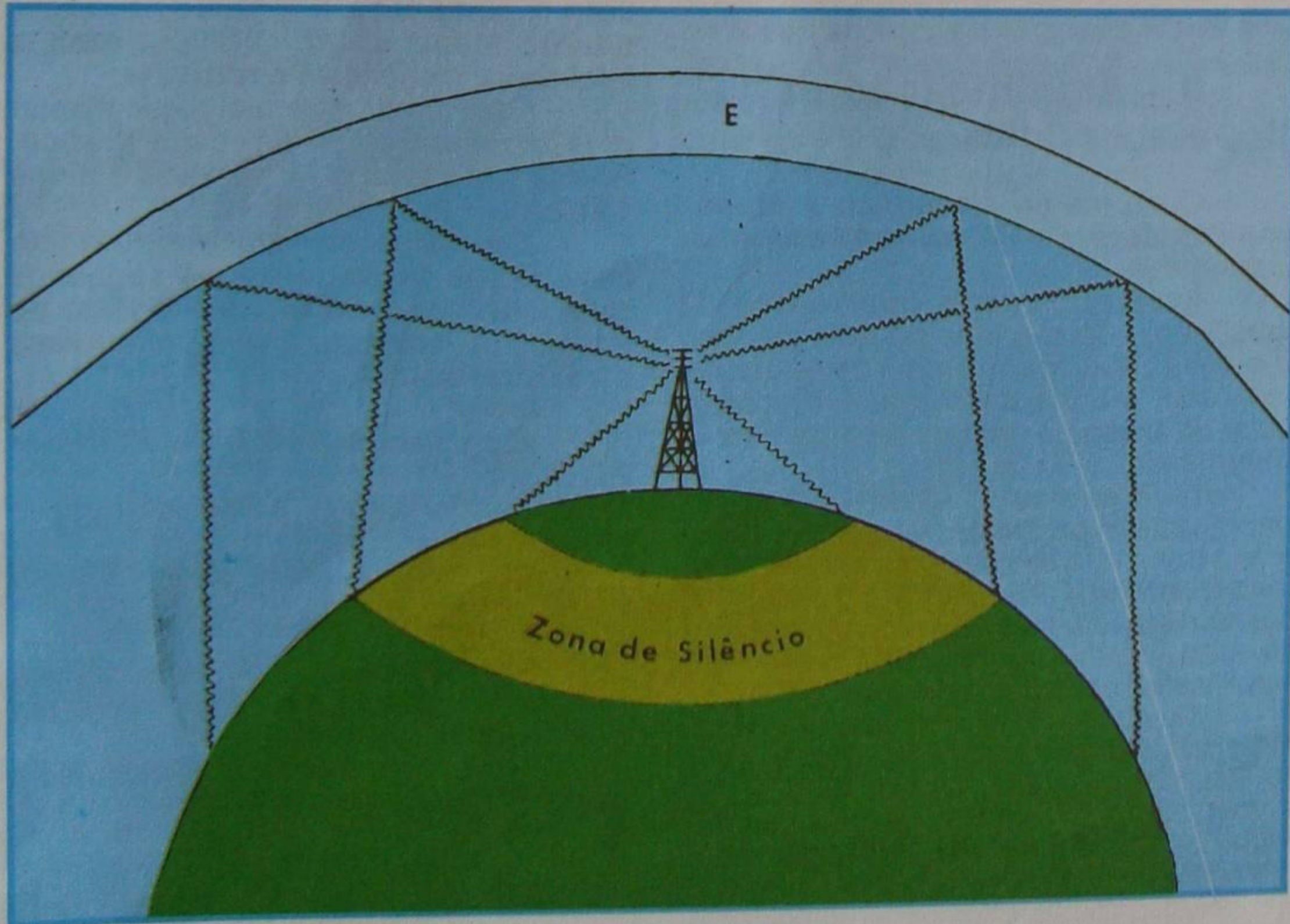
Figura 8 - Formação da zona de silêncio.

elevada, para cobrir grandes distâncias. O efeito do "fading" não afeta muito a recepção. A recepção durante a noite é melhor do que durante o dia, devido ao menor efeito ionizante do sol.

2) Ondas médias

As ondas médias vão de cerca de 500 a 1 600 KHz, ou, mais precisamente, 535 KHz a 1 605 KHz (valores fixados na Conferência Internacional de Telecomunicações, em 1947 nos EUA). São universalmente usadas no serviço de radiodifusão. As ondas terrestres são absorvidas fortemente pela terra, o que exige também transmissores de elevada potência, para cobrir distâncias longas. As ondas celestes são absorvidas, quase que totalmente pela ionosfera, durante o dia. Durante a noite, devido à menor ação do Sol, há reflexão das ondas celestes, e a propagação melhora bastante. É por este motivo que muitas emissoras, à noite, diminuem a potência de seus transmissores, pois assim evitam a interferência com radiodifusoras que possuem freqüência igual ou muito próxima. À noite, devido à reflexão das ondas celestes, a recepção é muito afetada pelo "fading". As transmissões de ondas médias são afetadas pela forte interferência, provocada pelas descargas atmosféricas (raios), principalmente no verão.

3) Ondas intermediárias e curtas

As ondas desta faixa vão de cerca de 10 a 100 metros. Suas ondas terrestres são fortemente absorvidas pela terra e obstáculos; por isso, têm alcance reduzido. Entretanto, as ondas celestes têm grande alcance. As ondas de 10 a 25 metros usam-se para comunicações diurnas, porque são pouco absorvidas pela camada **E**. À noite, essas ondas não são refletidas pela camada **E**, devido à diminuição da ionização, de modo que não são boas para comunicação a longa distância.

Para comunicação a longa distância são utilizadas as ondas de 25 a 70 metros, tanto no período diurno como no noturno. As ondas curtas sofrem menor interferência que os outros tipos de onda e, quanto menor o comprimento de onda, menor será também a interferência.

A grande vantagem das ondas curtas é que elas atingem distâncias muito grandes com transmissores de pequena potência.

Uma desvantagem da onda curta é que, em virtude do pequeno alcance das ondas terrestres e do ângulo de incidência das ondas celestes, por causa da direcionalidade de transmissão, forma-se uma "zona de silêncio" que, às vezes, se estende a centenas de quilômetros, dependendo da potência do transmissor. Na **figura 8**, ilustramos a formação da zona de silêncio.

Dentro da faixa de ondas intermediárias e curtas existem vários intervalos de freqüências, destinados à radiodifusão comercial e a radioamadores. Assim, por exemplo, as faixas de 2 300 KHz a 2 495 KHz e 3 200 a 3 400 KHz são destinadas à radiodifusão; receberam o nome de **ondas tropicais**, devido a sua melhor propagação nas regiões tropicais. De 7 000 a 7 300 KHz temos uma das faixas destinadas a **radioamadores**.

Observação: O aluno pode encontrar em seu receptor uma faixa de onda de 2 300 KHz até 7 500 KHz, denominada de **ondas tropicais**. Isto não significa que o intervalo todo seja de ondas tropicais, mas que ele engloba as ondas tropicais citadas mais acima. Além dessas ele contém duas faixas para radioamador - 3 500 a 4 000 KHz e 7 000

a 7 300 KHz - e outras de ondas curtas.

4) Ondas métricas, decimétricas e centimétricas

As ondas de comprimento menor que 10 metros, isto é, as de freqüências muito altas (VHF), ultra-altas (UHF) e superaltas (SHF), praticamente não são refletidas pela ionosfera; por isso, o alcance dessas ondas se restringem, apenas, ao das ondas terrestres. Estas, por sua vez, não têm difração, ou seja, não contornam os obstáculos, de modo que o alcance das ondas terrestres fica restrito ao alcance óptico, isto é, a onda vai até onde nossa vista alcança. Se ela encontrar um obstáculo, como uma montanha, um prédio alto, etc., ela parará.

A grande vantagem das ondas métricas é que a propagação não depende da hora do dia, e nem da época do ano, pois não é influenciada pela ionosfera. Não é perturbada pelo "fading", e tem grande facilidade para transmissões direcionais.

As ondas métricas são bastante utilizadas. Assim, elas são empregadas na transmissão de televisão, nas comunicações por microondas e nas comunicações espaciais (via satélite).

O aluno poderia pensar que isso é um contra-senso, pois afirmamos que seu alcance, na Terra, é pequeno. Acontece que o alcance é pequeno exatamente porque essas ondas não sofrem reflexão e refração na ionosfera, ou seja, elas atravessam as camadas ionizadas. Ora, atravessando essas camadas, elas atingem outros planetas ou satélites (Vênus, Marte, Lua, satélites artificiais, etc.) e são refletidas para a Terra, desde que dirigidas para tal, possibilitando a comunicação a distâncias fantásticas.

Acreditamos que, com este apanhado sobre a formação e propagação das ondas de rádio, o aluno esteja em condições de entender porque a recepção não é uniforme durante as 24 horas do dia e em todo o ano, porque as emissoras transmitem em freqüências diferentes durante as horas do dia, porque os sinais de televisão têm pequeno alcance, etc.

AMPLIFICAÇÃO DE RADIOFREQÜÊNCIA

Ao estudar os osciladores, mostramos como se podem produzir ondas eletromagnéticas de freqüência elevada, denominadas de onda de **radiofreqüência**, simbolizada por **RF**.

Essas ondas, depois de geradas, necessitam de amplificação em potência, antes de serem entregues ao elemento irradiador, que é a antena do transmissor. Quando recolhidas pela antena do receptor, tem intensidade bastante reduzida, o que obriga que as amplifiquemos, agora em tensão, até o nível conveniente à aplicação visada.

Na amplificação de radiofreqüência surgem problemas devido aos componentes reativos do circuito, que, como se sabe, dependem da freqüência. É por esta razão que se costuma estudar, separadamente, a amplificação de RF.

O problema geral consiste na escolha criteriosa dos elementos amplificadores e dos órgãos de acoplamento, de forma a se obterem as condições desejadas. Nesta aula, analisaremos os problemas fundamentais da amplificação de RF.

I - Tipos de amplificadores de RF

Do mesmo modo que em audiofreqüência, e como o aluno deve ter concluído da parte introdutória desta aula, há dois tipos de amplificadores de RF, que são: de **tensão** e de **potência**.

Os amplificadores de tensão têm largo emprego nos receptores de rádio e, analogamente ao que acontece com a amplificação de áudio, supõe-se, que os sinais de entrada tenham amplitude muito reduzida, de modo que se possam considerar constantes os parâmetros dos elementos amplificadores, na região de funcionamento. Por exemplo, os sinais recebidos na antena de um receptor de rádio são de apenas alguns microvolts. Após sofrer amplificações em um transistor, ficarão com algumas centenas de microvolts e somente depois de sucessivas amplificações, atingirão valor que ultrapasse a região de amplificação linear dos transistores, especialmente construídos para recepção.

Os amplificadores de potência são utilizados na saída dos transmissores. Geralmente, o objetivo principal é a obtenção do maior rendimento possível do equipamento, não sendo muito importante a distorção. Por isso, a amplificação de potência de RF é feita em classe B ou C, principalmente nesta última, onde o rendimento é maior.

II - Amplificação periódica e aperiódica

Costuma-se classificar a etapa amplificadora de RF em **periódica** e **aperiódica**.

A **amplificação aperiódica** é aquela em que o ganho do estágio não depende de nenhuma freqüência particular, própria da carga. Em outras palavras, **é aquela em que a carga não é sintonizada.**

Inversamente, dizemos que a amplificação é **periódica**, quando a carga, e, às vezes, também o circuito de entrada, **é sintonizada**. Neste caso, o ganho dependerá da freqüência própria do circuito sintonizado; por isso, o amplificador periódico é **seletivo**.

O estudo do amplificador de RF é feito, portanto, em função do tipo de carga, ou, por extensão, do tipo de acoplamento, uma vez que a carga de uma etapa vai ligada à entrada da seguinte.

a) Carga resistiva

O amplificador com carga resistiva, ou acoplamento RC, é do tipo aperiódico. Uma etapa de RF com acoplamento RC não é seletiva, o que significa dizer que há somente aumento de sensibilidade. Este tipo de amplificação não é muito utilizado, porque o ganho cai rapidamente com o aumento da freqüência.
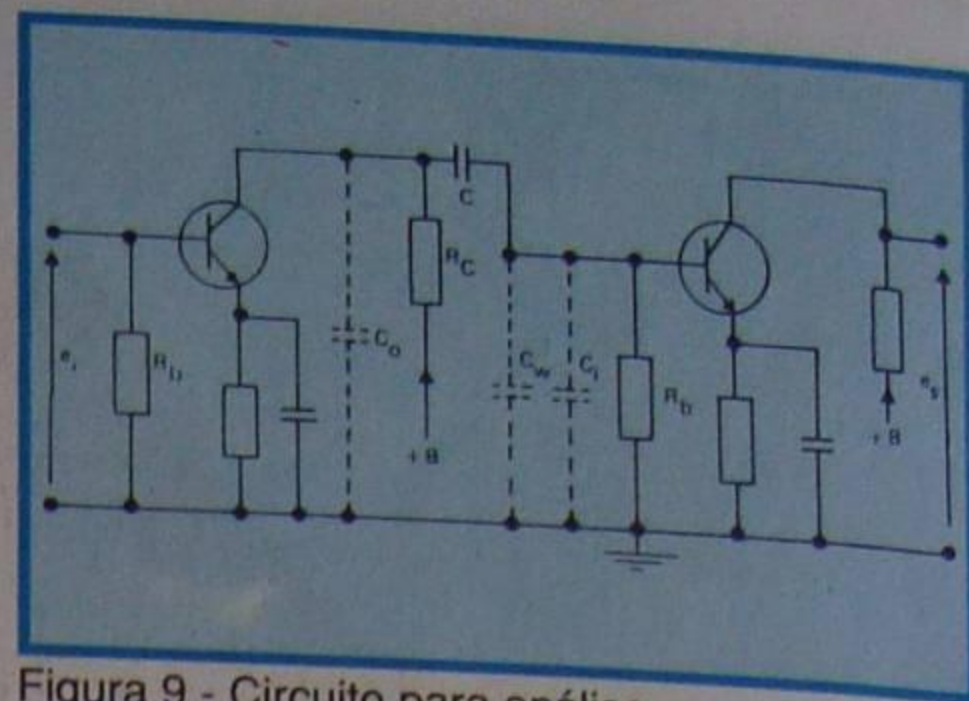
Figura 9 - Circuito para análise.

Seja, então, o circuito da **figura 9**, que é idêntico àquele analisado na amplificação de audiofreqüências. Chamemos de **C** o capacitor de acoplamento, $\mathbf{R_c}$ o resistor de carga e $\mathbf{R_b}$ o resistor de base.

O capacitor C não influi na amplificação, desde que tenha capacitância suficientemente alta, para ser considerado como curto-circuito para RF, o que é normal, na prática.

Entretanto, para as radiofreqüências, não se pode desprezar as capacitâncias parasitas dos elementos ativos (transistores), e, na realidade, são essas capacitâncias que limitam a amplificação. Devemos acrescentar, ainda, que às capacitâncias parasitas deve-se juntar aquela introduzida pela fiação. Na figura 9, representamos a capacitância de saída de um transistor por C_o, a de entrada por C_i e as das ligações por C_W. Essas capacitâncias, para RF, estão em paralelo e, conseqüentemente, se somam. Como o aluno sabe todo capacitor apresenta reatância que diminui com o aumento da freqüência, logo, quanto maior a capacitância e/ou a freqüência, menor será a reatância.

Para tornar mais real o que afirmamos, consideremos um caso prático. Admitamos que se queira amplificar RF de 1 MHz com dois transistores.

Consultando um manual de transistores encontramos as seguintes características, válidas para o ponto de trabalho lá indicado, o qual tomaremos para nosso exemplo:

capacitância entre base e emissor 2,2 pF (C_i)
capacitância entre coletor e emissor 0,8 pF (C_o)
capacitância entre coletor e base 2,0 pF

Vamos admitir que a capacitância da fiação (C_W) seja de 17 pF, que é um valor bastante razoável.

Nestas condições, a capacitância em paralelo com a carga será de:

$$C_T = C_i + C_o + C_W$$
$$C_T = 2{,}2 + 0{,}8 + 17 = 20 \text{ pF}$$

A reatância de C_T, na freqüência de 1 MHz, será:

$$X_{CT} = \frac{1}{6{,}28 \times F \times C_T}$$
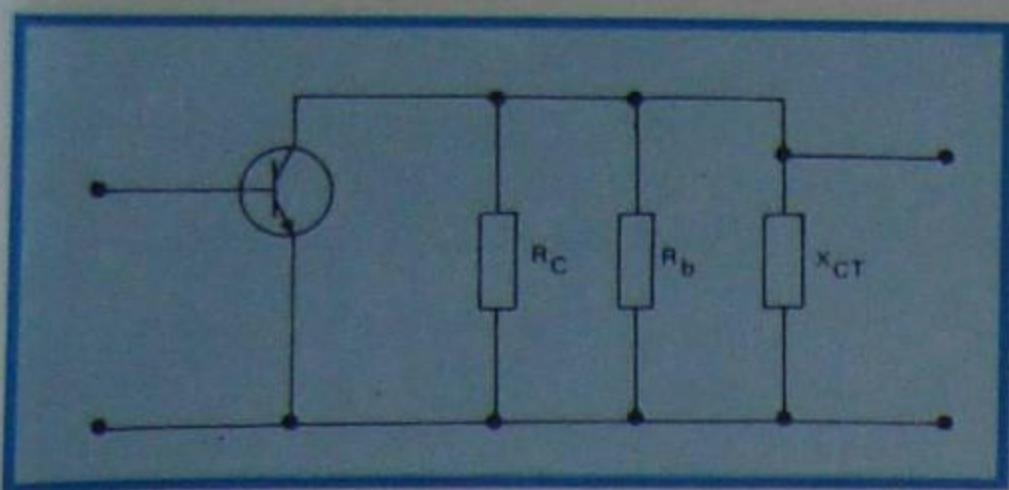
Figura 10 - Equivalente da figura 9 para CA.

$$X_{CT} = \frac{1}{6{,}28 \times 1\,000\,000 \times \dfrac{20}{1\,000\,000 \times 1\,000\,000}}$$

$$X_{CT} = \frac{1\,000\,000}{6{,}28 \times 20} = 7\,961{,}7$$

ou, aproximadamente, 8 000 Ω.

Se escolhermos resistores de carga e de base (R_c e R_b) de 500 KΩ cada, resultará como carga de RF a associação em paralelo desses dois resistores e da reatância que calculamos. Isto é o que mostramos na **figura 10**. Essa figura é chamada de equivalente do circuito da figura 9, para CA.

Resolvendo os valores numéricos, teremos:

1) Resultante de R_b em paralelo com R_c:

$$R_{eq} = \frac{500\,000 \times 500\,000}{500\,000 + 500\,000} = 250\,000$$

2) Resultante final, ou seja, da associação anterior com X_{CT}:

$$R_{CA} = \frac{250\,000 \times 8\,000}{250\,000 + 8\,000} = 7\,751{,}9$$

Nota-se que dobrando-se a freqüência, a reatância diminui para a metade e é, praticamente, a reatância de C_T que atua como carga para CA.

Efeito Miller

Miller descobriu que a capacitância de entrada de um transistor em funcionamento dinâmico, isto é, com tensão variável aplicada à sua base, não se resume, apenas, às capacitâncias parasitas (capacidades estáticas indicadas pelo manual, ou medidas diretamente), mas que a capacitância entre base e coletor se reflete para entrada multiplicada pelo ganho de tensão (que chamaremos de A_V) mais um.

Assim, sendo C_{bc} a capacitância entre base e coletor, C_{be} aquela entre base e emissor, a capacitância aparente de entrada, também chamada de **capacitância dinâmica**, é dada por:

$$C_d = C_{be} + (A_V + 1)\, C_{bc}$$

Em nosso exemplo, o ganho A_V é da ordem de 75 e a capacitância entre base e coletor é de 2 pF; logo, a capacitância dinâmica será de:

$$C_d = 2{,}2 + (75 + 1) \times 2$$

$$C_d = 2{,}2 + 152 = 154{,}2 \text{ pF}$$

A esse valor devemos somar, ainda, a capacitância da fiação, que admitimos ser 17 pF, resultando como capacitância total:

$$C_T = 17 + 154{,}2 \text{ pF} = 171{,}2 \text{ pF}$$

e não apenas 20 pF, como havíamos calculado. Em conseqüência, a resistência (no caso geral, impedância) de entrada do transistor é muito menor do que os 8 000 Ω e a amplificação também será bem menor.

Deste exemplo, podemos tirar algumas conclusões, que são gerais:

1ª) Para a amplificação de RF devemos escolher o dispositivo amplificador (transistor), que apresente baixa capacitância entre o terminal de entrada e o de saída.

2ª) Deve-se ter especial cuidado na distribuição dos componentes do circuito, a fim de reduzir ao máximo a capacitância parasita. Isto significa que as ligações devem ser curtas e, de preferência, distanciadas do chassi.

3ª) Em conseqüência do que acabamos de estudar, a utilização do acoplamento RC, na amplificação de RF, é bastante restrita. Entretanto, ela é usada nos amplificadores de vídeo dos receptores de televisão, onde o alcance de freqüência é aumentado até cerca de 4 MHz, através de artifícios (compensação), que estudaremos no momento oportuno.

b) Carga sintonizada

Circuito RLC paralelo

Na **figura 11**, apresentamos uma etapa amplificadora de RF, onde a carga do primeiro transistor é um circuito ressonante RLC paralelo. A resistência R é a resistência própria (ôhmica) do enrolamento, cuja indutância é L. O capacitor Cv é o de sintonia, que é ajustável ou variável.
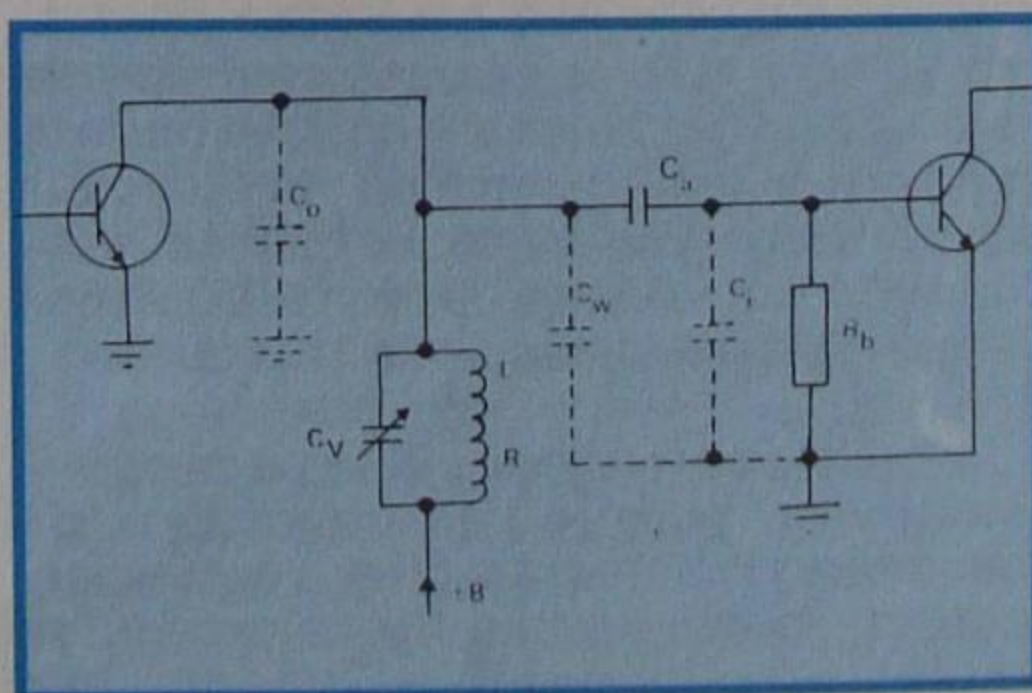
Figura 11 - Etapa amplificadora de RF.

Ca é o capacitor de acoplamento e Rb o resistor de base. Como no caso do acoplamento RC, o capacitor Ca deve ter capacitância suficiente para que possa ser considerado como curto-circuito para RF.

Em poucas palavras, o modo de operação desse circuito é o seguinte:

Suponhamos que na base do primeiro transistor seja aplicado um sinal, cuja freqüência f_o coincida com a freqüência de ressonância do circuito de carga. Esse sinal será amplificado pelo transistor e aparecerá no coletor. Como ele encontra ressonância paralela, não poderá passar nem por C_V, nem por L, de modo que se encaminhará para a entrada do transistor seguinte, através do capacitor C_a.

Qualquer outro sinal que tenha freqüência diferente daquela de ressonância se escoa para terra através de L, ou de C_V. Fica claro, portanto, que o amplificador é **seletivo**, porque o circuito ressonante paralelo seleciona a freqüência, para a qual sua impedância é máxima. Essa freqüência é chamada de **freqüência de sintonia** do circuito. Nela a amplificação é **máxima**. Para freqüências superiores ou inferiores à de ressonância, a amplificação **diminui**.

A amplificação não cai abruptamente, mas sofre diminuição gradual, cuja velocidade depende da qualidade do circuito. Para caracterizar o que afirmamos, o aluno deve observar a **figura 12**. Aí, desenhamos a variação da amplificação com a freqüência, para dois circuitos distintos, mas ressonantes na mesma freqüência e apresentando o mesmo ganho máximo. Essa figura servirá para conceituarmos o problema e, também, para apresentarmos uma característica importante do amplificador sintonizado, que é sua **banda passante**.
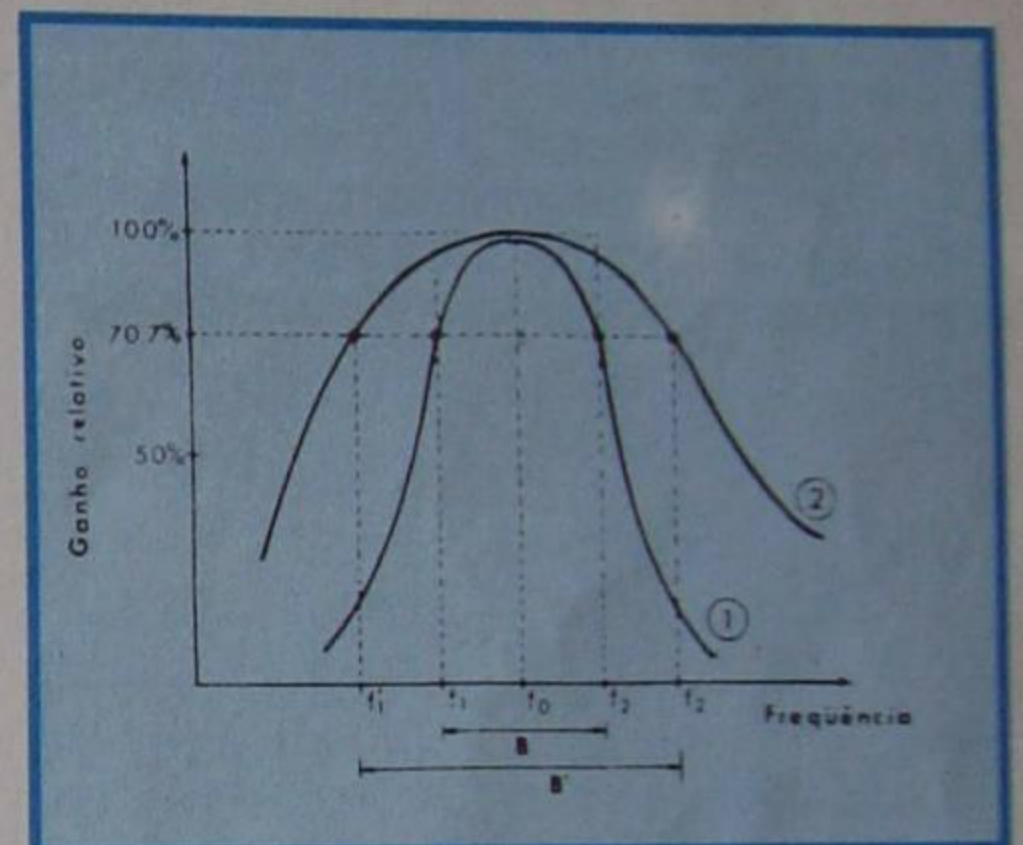
Figura 12 - Variação da amplificação com a freqüência.

1 - Banda passante

Para maior simplicidade de exposição, admitamos que a freqüência de ressonância seja de 1 MHz, que f_1 seja de 0,99 MHz, f_2 = 1,01 MHz, f'_1 = 0,9 MHz e f'_2 = 1,1 MHz. É fácil de ver que a amplificação cai rapidamente, quando a freqüência se modifica em torno de 1 MHz (f_o), para o amplificador cuja resposta é a da curva 1 e cai lentamente, para o amplificador cuja resposta é a da curva 2.

Assim, quando a freqüência é de 0,99 MHz ou 1,01 MHz, ou seja, quando ela varia de 10 KHz para mais, ou para menos, da freqüência de ressonância, o ganho cai de cerca de 30% para o amplificador da curva 1, e quase nada, para o amplificador da curva 2. O amplificador da curva 2 só terá seu ganho diminuído em cerca de 30%, quando a freqüência se afastar de 100 KHz da freqüência de ressonância, isto é, nos pontos f'_1 e f'_2.

O intervalo de freqüência de um amplificador sintonizado, para o qual o

ganho de tensão é maior do que 70,7% do valor máximo, é chamado de **banda passante**. Assim, a banda passante para o circuito da curva 1 corresponde ao intervalo cujas freqüências variam desde f_1 até f_2, isto é, desde 0,99 até 1,01 MHz, no exemplo numérico. Representamo-lo por B. Note que a banda passante, neste caso, será de:

1,01 - 0,99 = 0,02 MHz, ou seja, 20 KHz.

Para a curva 2, a banda passante está representada por B'. Em nosso exemplo numérico, ela vale:

1,1 - 0,9 = 0,2 MHz ou 200 KHz

O circuito da curva 2 é muito **menos** seletivo do que o da curva 1.

As curvas, como a 1 e 2, são chamadas de **curvas de seletividade**.

2 - Influência do Q

O aluno aprendeu que a seletividade de uma bobina depende do seu **fator de mérito**, ou seja, de seu **Q**. Quanto mais alto é o Q, mais seletiva é a bobina e, conseqüentemente, mais aguda é a curva da seletividade.

O fator de mérito depende da resistência ôhmica da bobina em RF, como demonstra sua fórmula de definição:

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Para a recepção das ondas de rádio, as bobinas são construídas de modo que apresentem um Q determinado, denominado de **Q em vazio** e, geralmente, indicado por Q_o. Este Q deve ser tal que proporcione a banda passante adequada. Se o Q for muito baixo, a banda passante será larga e o circuito pouco seletivo. Ligada ao circuito de entrada de um receptor de rádio, a bobina de Q baixo provocará "mistura" de estações. Por outro lado, uma bobina de Q muito elevado torna-se seletiva demais e produz "corte" de freqüências. Uma emissora de rádio tem intervalo de freqüência de modulação, que se estende desde 4,5 KHz abaixo a 4,5 KHz acima da freqüência central (isto em AM). Se a bobina que seleciona a emissora tiver banda passante de 6 KHz, por exemplo, ela "cortará" todas as freqüências de modulação acima de 3 KHz. Neste caso, embora o receptor não misture emissoras, ele terá resposta de freqüência de áudio inadequada, porque se perderão todas as notas agudas da modulação.

3 - Q do circuito

Sabe-se que o Q da bobina depende da resistência R, que constitui a resistência de perda da bobina. Se ligarmos em paralelo com a bobina outras resistências, estaremos aumentando sua resistência de perdas e, conseqüentemente, diminuindo a seletividade. Diremos que o circuito RLC ressonante está **"amortecido"**.

Ao se ligar um circuito ressonante
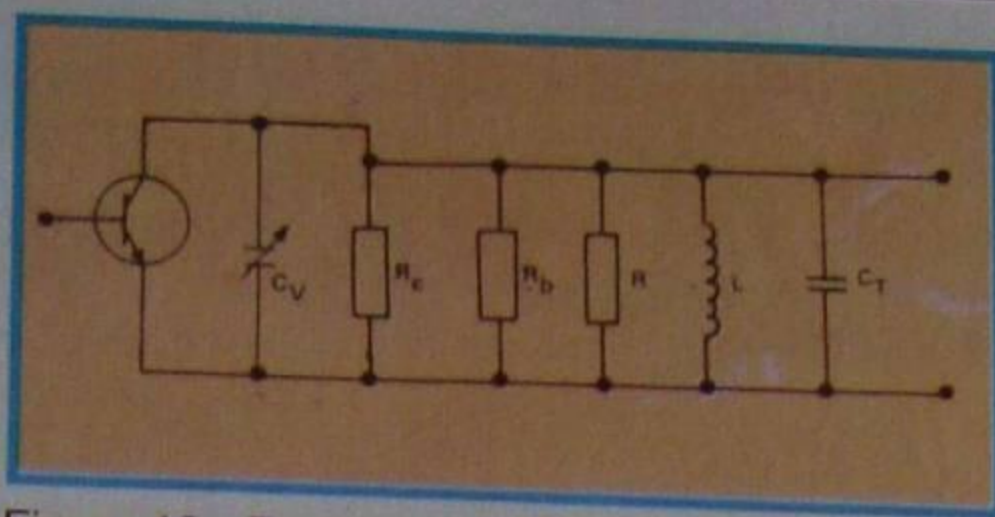
Figura 13 - Equivalente da figura 11, para RF.

como carga do amplificador, introduz-se em paralelo com ele a resistência de saída do elemento ativo (transistor) e, também, a resistência de entrada do estágio seguinte. Em conseqüência, o Q não será mais aquele da bobina, mas um outro **menor**, que recebe o nome de **Q carregado** ou **Q do circuito**, e se costuma representá-lo por Q_c.

Na **figura 13**, mostramos o circuito equivalente para RF do circuito da figura 11.

Nessa figura, o aluno pode observar duas coisas importantes:

1ª) que a capacitância C_T, que corresponde à associação mista das capacitâncias C_o, C_i, C_w, e C_a, está em paralelo com a capacitância de sintonia do circuito. Essas capacitâncias, fazendo parte da de sintonia, não derivarão, para a terra, a freqüência para a qual o circuito está sintonizado, mesmo que essa freqüência seja muito elevada;

2ª) que as resistências de coletor do 1º o transistor (R_c) e de base do 2º transistor (R_b) estão em paralelo com a resistência em RF da bobina L. Quanto à resistência de entrada, resume-se exclusivamente na de base, porque se admite que a resistência entre base e emissor seja muitíssimo grande e não influa no amortecimento do circuito.

4 - Resistência dinâmica

Afirmamos anteriormente que, no circuito ressonante paralelo, a impedância é máxima para a freqüência de ressonância. Se não houvesse perdas, isto é, se a bobina tivesse **resistência nula** e não houvesse **amortecimento externo**, a impedância na ressonância seria **infinita**. Entretanto, na prática, essa situação não existe, porque a bobina sempre terá a resistência própria do fio.

Na ressonância, a impedância é resistiva, porque a condição de ressonância é que as duas reatâncias, tanto da bobina como do capacitor, se anulem mutuamente. Quando isto acontece, a impedância recebe o nome de **resistência dinâmica** do circuito.

A teoria demonstra que a resistência dinâmica é determinada pela fórmula:

$$R_d = \frac{L}{CR}$$

onde L é a indutância da bobina, C o capacitor de sintonia e R a resistência de amortecimento. Uma pequena transformação da fórmula acima permite escrever, também, que:

$$R_d = Q \cdot X_L \quad \text{ou} \quad R_d = Q \cdot X_C$$

A resistência dinâmica em paralelo com a resistência de amortecimento constitui a **carga** do circuito amplificador.

c) Transformador sintonizado

O acoplamento por transformador sintonizado é o que mais se emprega na amplificação de RF. Nesses
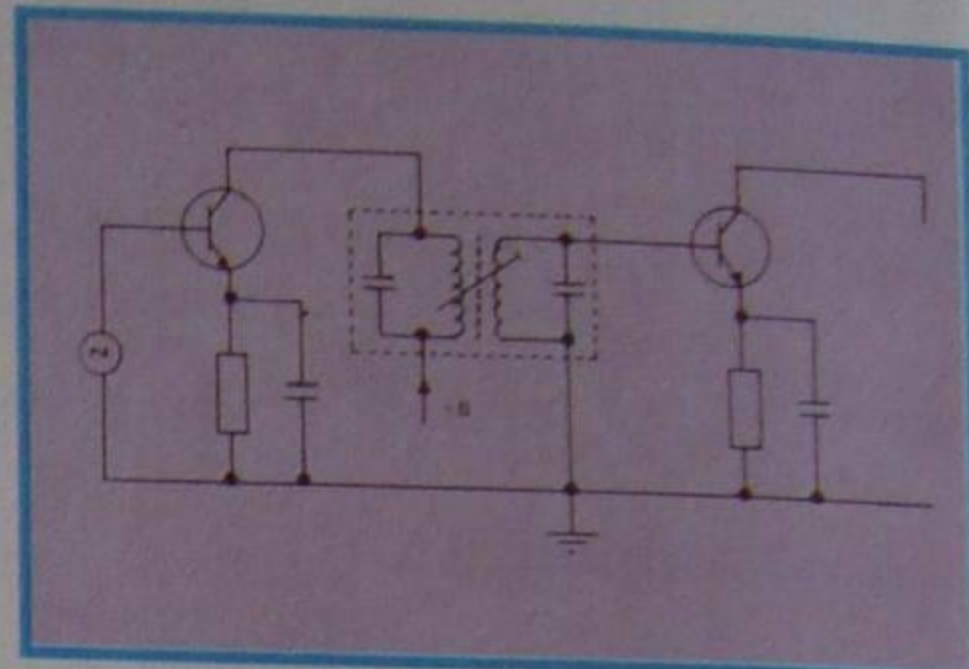
Figura 14 - Amplificador de RF com acoplamento por transformador.

transformadores, tanto o primário como o secundário são constituídos por simples enrolamentos com núcleo de ferrite. Na **figura 14**, apresentamos o circuito típico de um amplificador de RF acoplado por um transformador.

Este circuito é típico dos amplificadores de FI (freqüência intermediária).

No acoplamento por transformador, podemos ter uma das situações seguintes: **primário sintonizado, secundário sintonizado** e **primário e secundário sintonizados**.

1) Transformador com primário sintonizado

Na **figura 15**, apresentamos o esquema de um estágio amplificador de RF acoplado a transformador, onde o primário é sintonizado.
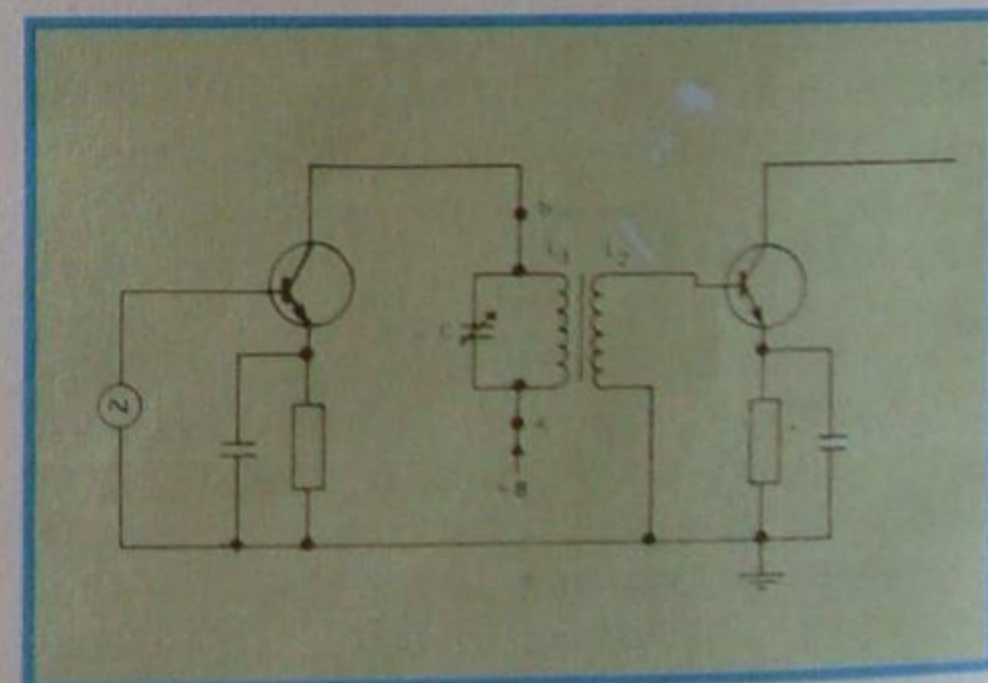
Figura 15 - Amplificador de RF com acoplamento por transformador sintonizado.

O funcionamento do circuito é o seguinte:

Através do circuito coletor-emissor do 1º transistor, circula corrente, cuja freqüência é igual a de entrada. Se essa freqüência coincidir com a freqüência de ressonância do circuito L_1 C (primário do transformador), a resistência dinâmica será máxima, e a maior tensão aparecerá nos terminais a-b. Essa tensão induzirá no enrolamento L_2 (secundário do transformador) uma força contra-eletromotriz, de mesma freqüência da tensão do primário, e cujo valor dependerá do grau de acoplamento entre as duas bobinas e
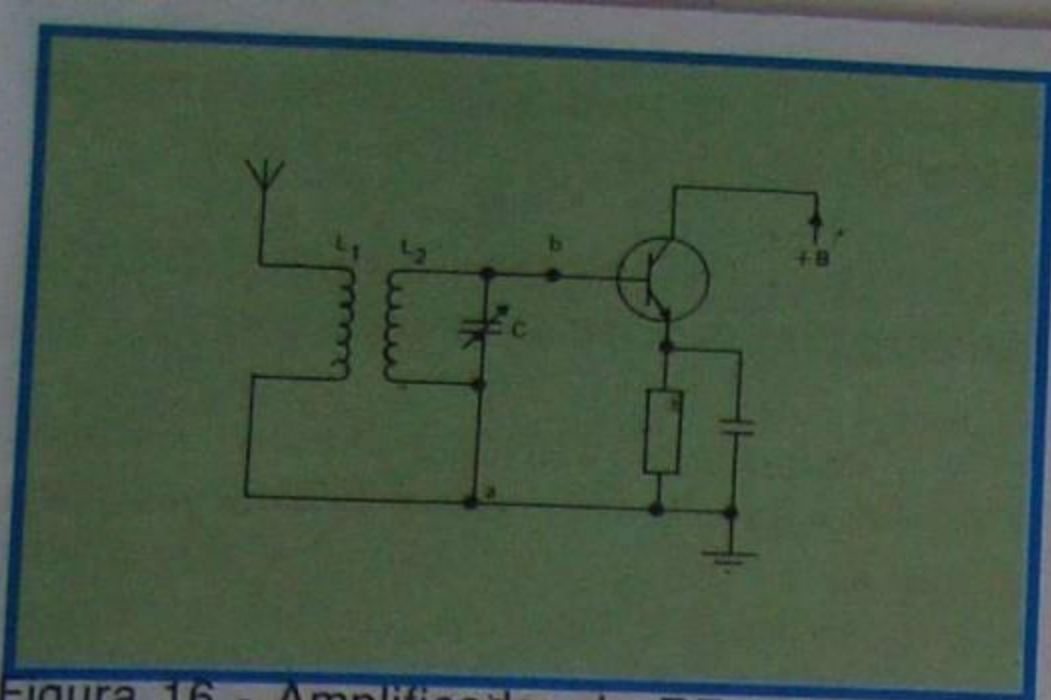
Figura 16 - Amplificador de RF com acoplamento por transformador com secundário sintonizado.

do número de espiras dessas bobinas.

2) **Transformador com secundário sintonizado**

Na **figura 16**, mostramos o circuito de um estágio amplificador, onde o secundário do transformador de acoplamento é sintonizado. Este circuito é típico do estágio de entrada (sintonia) dos receptores de rádio transistorizados. O aluno deve observar que, agora, estamos acoplando a antena do receptor ao transistor amplificador. Isto não restringe a generalidade do circuito, porque a antena pode ser considerada como um gerador.

O funcionamento do circuito da figura 16 pode ser explicado como segue:

Pela antena chegam ondas, que induzem, no primário do transformador (L_1) tensão de variadas freqüências. Essa tensão é induzida no secundário sintonizado (L_2C). Quando a freqüência da tensão induzida coincidir com a freqüência de ressonância do circuito sintonizado, a tensão entre **a** e **b** será a maior possível, sendo amplificada pelo transistor. Na prática, o capacitor C é variável, para que se possa **sintonizar** o circuito secundário com grande número de emissoras. O transformador recebe o nome de **bobina de antena**. A seletividade, ou seja, a banda passante dependerá do Q do circuito.

3) **Transformadores com ambos os enrolamentos sintonizados**

Os amplificadores com dupla sintonia, isto é, com primário e secundário sintonizados (normalmente na mesma freqüência), são bastante utilizados devido a sua característica de elevado ganho e grande seletividade. São largamente empregados no acoplamento de RF dos amplificadores de FI, dos receptores de rádio. Um exemplo hipotético do circuito é aquele que mostramos na **figura 17**. Quando a freqüência do sinal de coletor coincide com a freqüência própria do primário, ele entra em ressonância e induz, no secundário, tensão com a mesma freqüência. Se o secundário é ajustado para ressonar na mesma freqüência do primário, então, a tensão aplicada à base terá o maior valor possível.

Figura 17 - Acoplamento com transformador de dupla sintonia.

O ganho e a seletividade do amplificador dependerão do fator de acoplamento dos enrolamentos, isto é, da distância entre os dois enrolamentos (considerando-os com núcleo de ar). Na **figura 18**, mostramos os casos possíveis. A curva **a** corresponde ao caso em que o acoplamento é fraco. Nesta situação, o ganho é pequeno e a banda passante é estreita. No caso-limite, em que a mútua indutância entre os enrolamentos é nula, não há ganho, o que é lógico, porque não há transferência de energia do primário para o secundário.
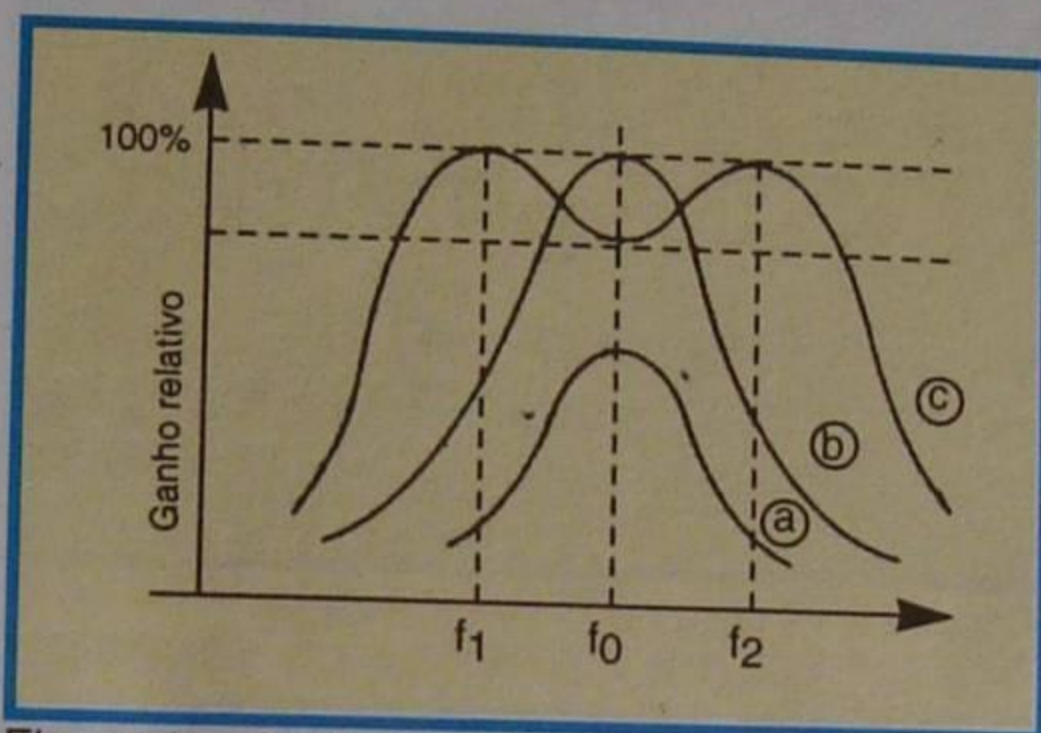
Figura 18 -Gráfico para análise.

A curva **b** corresponde à situação de acoplamento ótimo. Neste caso, o ganho é máximo e a curva apresenta um único pico.

A curva **c** mostra o caso de acoplamento forte. A curva apresenta dois picos onde o ganho é máximo. Há alargamento da banda passante, mas o ganho da freqüência central (f_o) é menor que o máximo.

Costuma-se indicar **o fator de acoplamento** pela letra **k**. A curva **b** corresponde ao k = 1, também chamado de **acoplamento crítico**. A curva **a** corresponde a **k** menor que 1, e diz-se que é de acoplamento menor que o crítico. Finalmente, a curva **c** mostra o caso em que **k** é maior do que 1, isto é, acoplamento maior do que o crítico.

Na prática, costuma-se dizer que a curva **a** corresponde ao acoplamento **débil ou fraco**, a **b** ao acoplamento **crítico ou ótimo** e a **c**, ao acoplamento **forte ou cerrado**.

III - Características dos amplificadores de RF transistorizados

No emprego do transistor, não se pode fazer certas simplificações, porque esse elemento possui tanto resistência de entrada como de saída com valores bem baixos. Além disso, a entrada (geralmente base) não é isolada da saída (geralmente coletor), e há realimentação (volta) do sinal, que pode provocar oscilações, se não forem providenciadas medidas para sua neutralização.

a) Particularidades no acoplamento

Na figura 16 mostramos um estágio de entrada de um receptor de rádio que usa transistor como amplificador. Se montarmos o circuito, teremos a decepção de comprovar que ele **não seleciona emissora alguma**. A explicação disso é que a resistência de entrada do transistor, sendo muito pequena, amortece exageradamente o circuito sintonizado, destruindo sua característica seletiva. O problema é solucionado fazendo-se um arranjo, como o mostrado na **figura 19** ou **figura 20**.

O funcionamento do circuito da figura 19 é o seguinte:

O enrolamento da antena L_A induz tensão em L_1, que faz parte do circuito ressonante.

Quando a freqüência da tensão induzida coincidir com a freqüência de
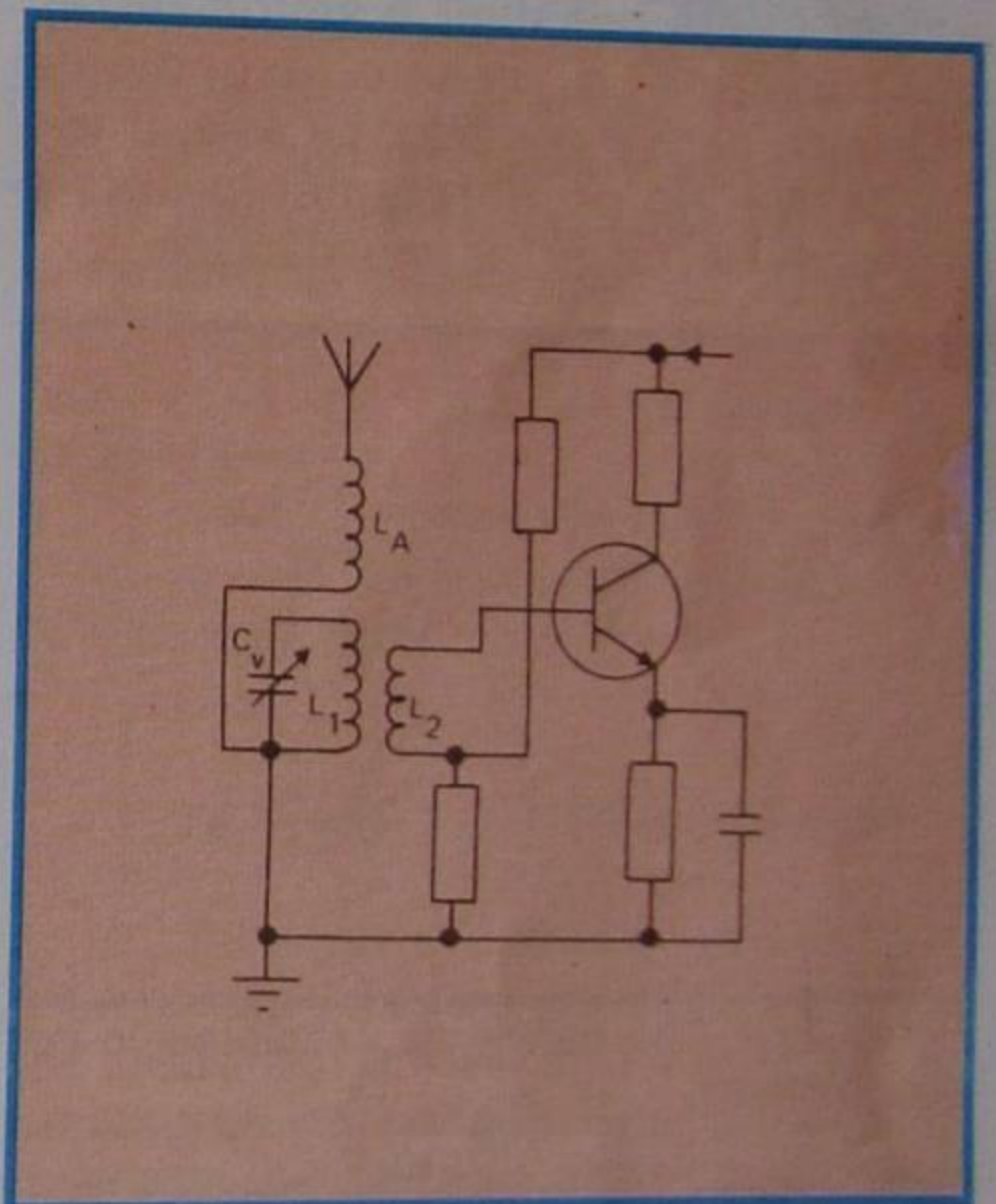
Figura 19 - Variante da figura 16.
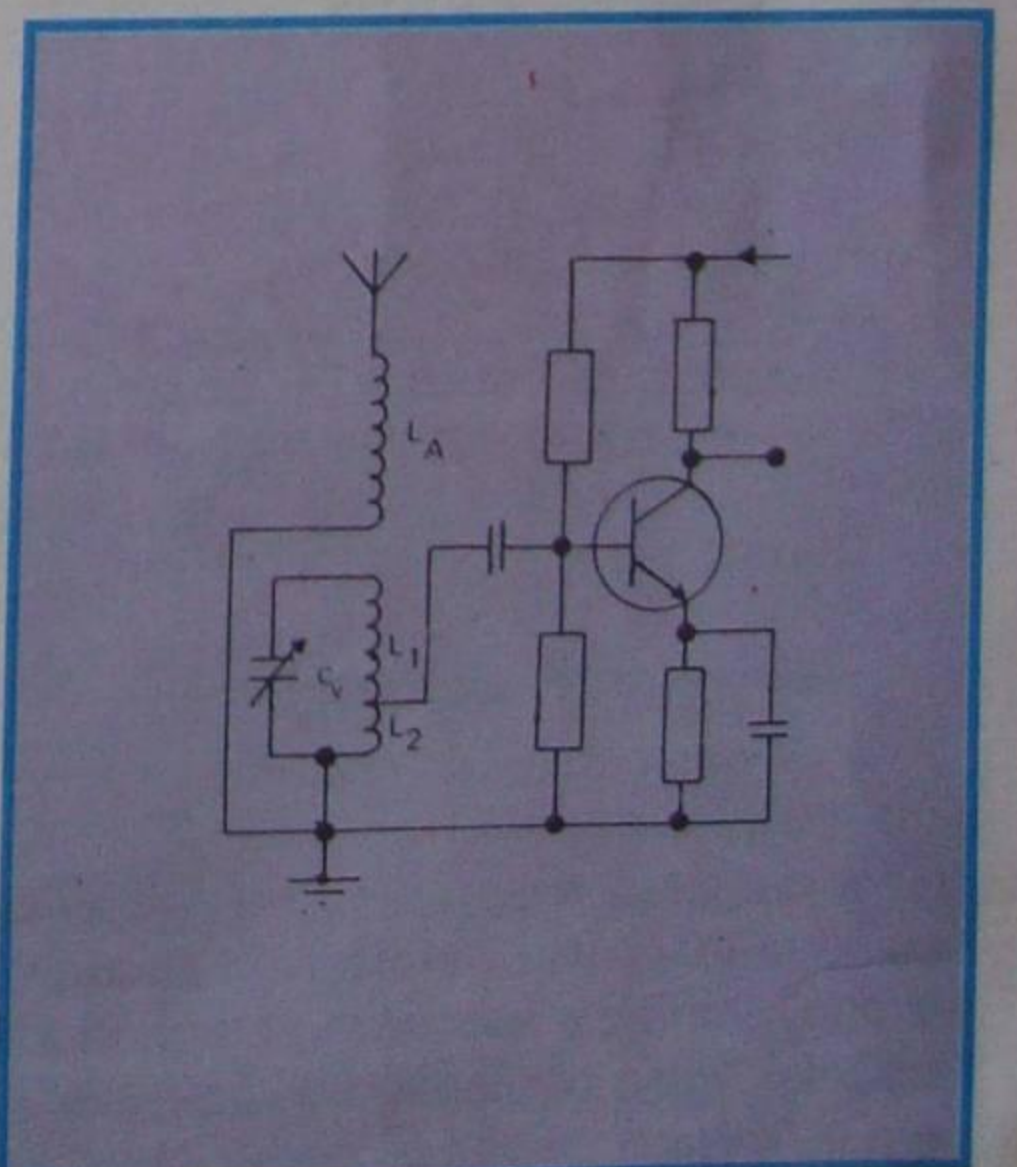
Figura 20 - Variante da figura 19.

ressonância do circuito L_1C_V, a tensão induzida será máxima. O circuito L_1C_V, por sua vez, transfere sua energia à base do transistor, através do enrolamento de acoplamento L_2.

Convém observar que a resistência de entrada do transistor ainda terá influência no amortecimento do circuito sintonizado, mas a teoria sobre transformadores ensina-nos que a resistência do secundário atua no primário (dizemos que se **reflete** no primário), multiplicada pelo quadrado da relação de espiras entre primário e secundário. Desta maneira, sendo alta a relação de espiras, a resistência refletida no circuito ressonante será, também, elevada, e sua influência sobre o amortecimento diminuirá.

O circuito da figura 20 tem funcionamento semelhante ao descrito. A única diferença está no uso de um autotransformador, em lugar do transformador de enrolamentos separados da figura 19.

Na **figura 21**, mostramos um tipo básico de acoplamento por transformador sintonizado. É costume sintonizar-se apenas o primário, porque a baixa resistência de entrada do transistor amorteceria demais o secundário, se fosse sintonizado, embora seja possível a sintonização, utilizando-se o mesmo expediente mostrado para o primário, ou seja, o uso de derivação no enrolamento com a finalidade de "casar" as impedâncias.
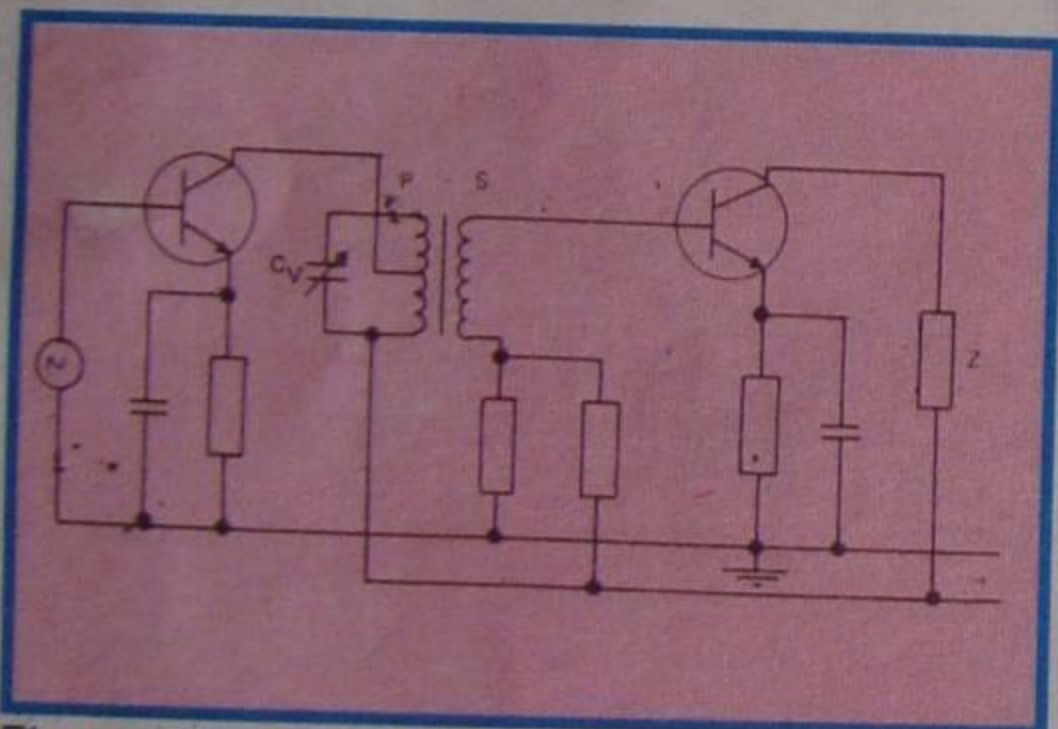
Figura 21 - Tipo básico de acoplamento por transformador.

Devemos esclarecer que a resistência de saída do transistor também amortece o circuito sintonizado e, por isso, usa-se o mesmo artifício que indicamos para os circuitos das figuras 19 e 20, isto é, utilizar um transformador com 3 enrolamentos separados, ou seu equivalente da figura 21, onde o primário é um autotransformador. É possível, ainda, eliminar a derivação do primário, mas isto explicaremos na aula específica sobre receptores transistorizados.

b) Neutralização

Quando se tem amplificador de RF sintonizado, transistorizado, há possibilidade, como já afirmamos, de ocorrer realimentação do sinal de saída para a entrada, com fase adequada para produzir oscilação. Essa oscilação é indesejável e deve ser evitada. Isto se consegue, fazendo-se com que o circuito de saída fique eletricamente **isolado** do de entrada. Quando isto se dá, dizemos que o circuito está **neutralizado**.

Para o transistor, os dois métodos de neutralização mais usuais são o da **unilateralização** e o do **descasamento**.

1 - Unilateralização

Sabemos que um circuito é auto-oscilante, quando o sinal de saída retorna ao de entrada com a mesma fase. No transistor, a realimentação se faz internamente, através da **capacitância** e **resistência** entre **coletor** e **base**. O processo de neutralização consiste em aplicar, na entrada, outro sinal de **mesma intensidade**, mas de **fase oposta**, para anular o efeito do primeiro. Na **figura 22**, mostramos um circuito típico de etapa de FI neutralizada.
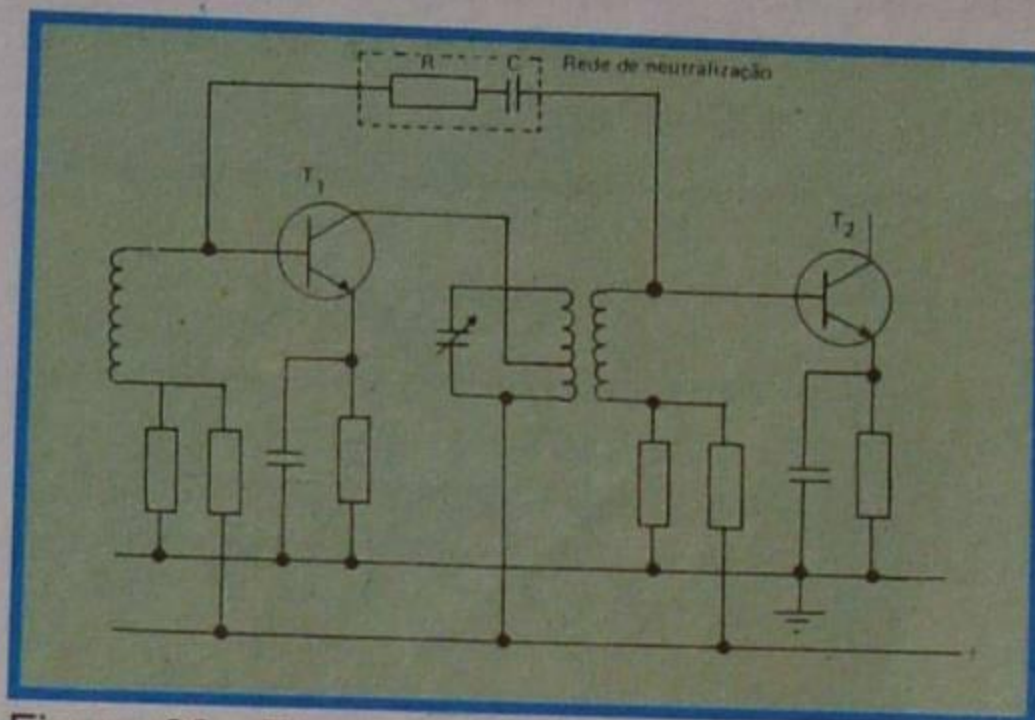
Figura 22 - Etapa de FI neutralizada.

Como se observa, da saída para a entrada de T_1 há uma rede, composta por um resistor R e um capacitor C, que introduz o sinal de neutralização. A retirada do sinal do secundário do transformador tem duas vantagens:

1ª) Facilita a escolha da fase correta.

2ª) Permite levar em consideração a relação de transformação de primário para secundário e, com isso, diminui a resistência de neutralização e aumenta a capacitância. A vantagem de se empregar capacitância elevada está em que uma eventual variação dessa capacitância terá sua influência diminuída, no circuito.

Muitas vezes, a resistência de neutralização não é utilizada.

Para encerrar, acrescentamos que é possível neutralização através de indutância.

2 - Descasamento

O segundo método de assegurar a estabilidade do amplificador de RF sintonizado é o do descasamento entre entrada e saída. Neste caso, o estágio apresenta ganho menor do que se estivesse unilateralizado, mas, em compensação, é mais estável em uma faixa maior de freqüências. De forma esquemática, o estágio descasado pode ser aquele que mostramos na figura 21. Efetivamente, o descasamento acontece, obrigando-se a que a transferência de sinal do primário para o secundário não se efetue com a máxima potência; em outras palavras, que a carga do primário seja diferente da carga do secundário.

IV - Associação em cascata de amplificadores sintonizados

Via de regra, apenas um estágio amplificador de RF não é suficiente para elevar o nível de sinal ao valor adequado à aplicação que se visa. Então, é necessário associar vários amplificadores, de modo que o sinal de saída de um estágio seja o de entrada do estágio seguinte, e assim por diante. Diz-se que a associação é em **cascata.**

Na **figura 23**, mostramos a associação de três estágios em cascata. Nesta figura, os três estágios são de sintonia simples, entretanto, poderiam ser de sintonia dupla.
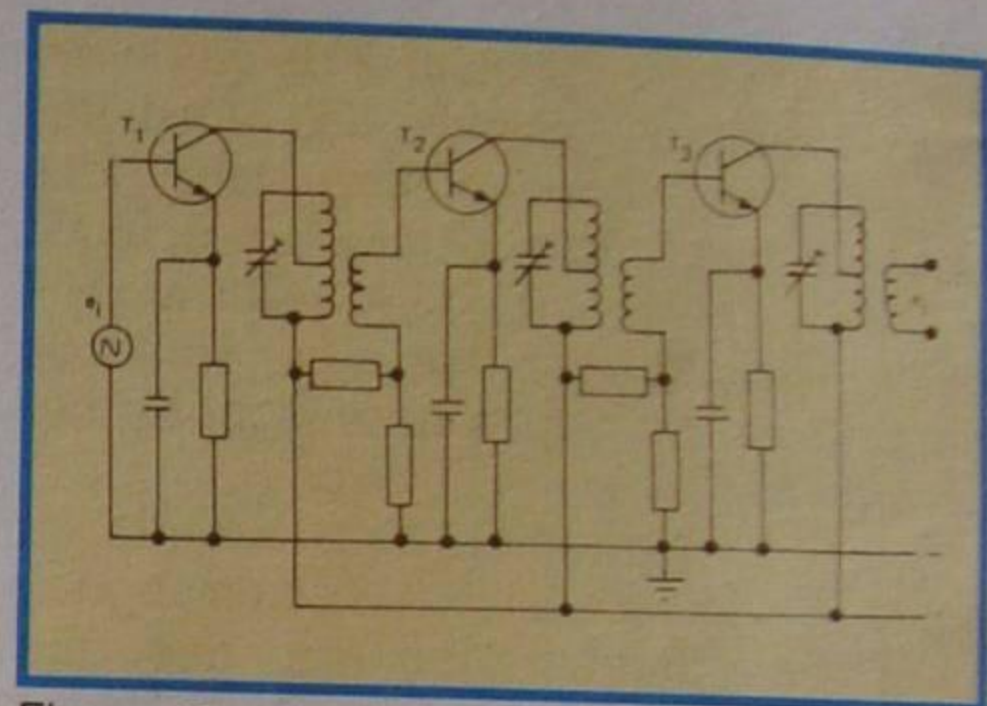
Figura 23 - Amplificador de FI com associação de etapas em cascata.

Em qualquer circunstância, o ganho total será igual ao produto dos ganhos de cada estágio, separadamente.

Verifica-se que a banda passante da associação é menor do que a de um estágio, individualmente. É claro que estamos admitindo que os estágios tenham **mesma** banda passante.

Por outro lado, na associação de estágios com sintonia dupla, a banda passante também diminui; entretanto, menos do que no caso de sintonia simples.

V - Sintonia escalonada

Para encerrar esta lição, vamos acrescentar que se pode fazer uma associação em cascata com os estágios sintonizados em freqüências diferentes. Diz-se, neste caso, que a sintonia é **escalonada**. Com esse experiente, aumenta-se a banda passante. Esta prática é muito utilizada em amplificadores de FI para televisão, onde a banda passante é de cerca de 4,5 MHz, como se verá nas aulas de TV.

Como última observação, devemos mencionar que, a título explicativo, utilizamo-nos de transformadores de FI com sintonia capacitiva, sendo que, normalmente, isto não é empregado.

A maneira mais usual empregada para se ajustar um transformador de FI, consiste em se utilizar um núcleo ajustável, normalmente de ferrite, o qual permite "sintonizar" a freqüência específica que se deseja amplificar.

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV

14ª LIÇÃO PRÁTICA

TRANSMISSORES E AMPLIFICAÇÃO DE RF

Chamamos de **transmissor** o dispositivo que produz e irradia as ondas eletromagnéticas de rádio. Esse dispositivo, fundamentalmente, é simples podendo-se construir um transmissor, com o emprego de um só transistor. É claro que os transmissores utilizados nas grandes "estações" de rádio são complexos, mas a complexidade não se deve ao princípio de funcionamento e, sim, à exigência de cada um dos estágios do transmissor, devido à grande potência liberada, à estabilidade de freqüência, à freqüência de funcionamento, etc.

Basicamente, o transmissor apresenta as seguintes etapas:

1 - amplificador de áudio;
2 - modulador;
3 - oscilador de radiofreqüências;
4 - amplificador de radiofreqüências;
5 - fonte de alimentação.

Essas etapas estão interligadas, como vemos no diagrama de blocos da **figura 24**.
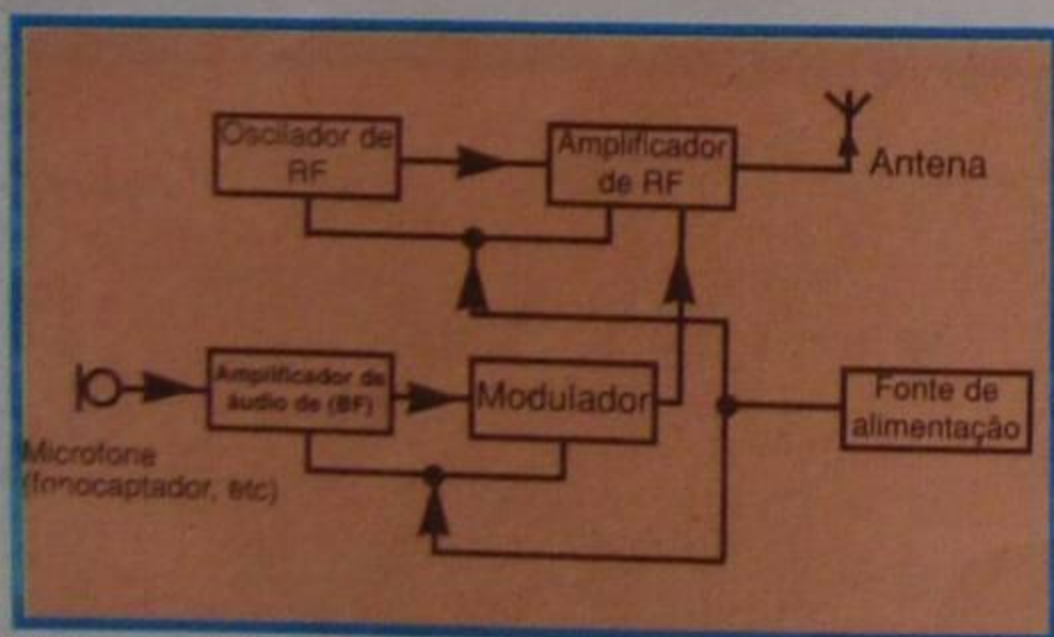
Figura 24 - Diagrama em blocos de um transmissor.

Ao amplificador de baixa freqüência (áudio) acham-se ligados os transdutores de entrada, que podem ser um ou vários microfones, fonocaptadores, cabeças reprodutoras de fita, etc. O sinal proveniente do amplificador de áudio passa pela etapa denominada **moduladora**, onde ele é elevado em potência e transferido ao estágio **amplificador de radiofreqüência**. Este último estágio recebe, também, a onda de radiofreqüência produzida no oscilador. A onda de radiofreqüência é amplificada pelo estágio de RF e sobreposta (modulada) ao sinal do modulador, e o resultado - onda de radiofreqüência modulada - é levado à antena.

Evidentemente, existem transmissores com maior ou menor número de estágios, tudo dependendo das necessidades individuais. Os transmissores para telegrafia (CW) não necessitam do estágio amplificador de áudio, e no caso de transmissão por portadora não há necessidade nem do modulador. Os transmissores para freqüências elevadas, geralmente, possuem um ou mais estágios destinados a multiplicar a freqüência fundamental, gerada pelo oscilador até o valor de freqüência desejado.

Dos estágios acima enumerados, o aluno só não tomou conhecimento do **modulador e amplificador de radiofreqüência**. Nesta lição descrevemos o modulador sucintamente, já que o assunto é vasto e foge um pouco ao escopo de nosso curso, que é a radiorrecepção. Nesta mesma lição, tratamos do amplificador de RF que é um estágio comum em funcionamento, tanto ao transmissor como ao receptor. Se tratarmos do assunto transmissão, será apenas para enfatizar os problemas da recepção, uma vez que estes devem ser resolvidos de acordo com o sistema de transmissão. Trocando em miúdos, devemos entender como é feita a transmissão das ondas de rádio, para podermos conceber os circuitos de recepção.

I - Modulação

Chama-se **modulação** ao processo mediante o qual uma das características de onda é modificada de acordo com as características de uma outra onda. A onda que tem sua característica modificada é chamada de **portadora** e a onda modificadora recebe o nome de **modulante** ou **moduladora**. Nas transmissões normais de radiodifusão, a onda de radiofreqüência é a portadora e a onda de sinal é a moduladora.

A onda portadora serve apenas como **veículo de transporte** para a moduladora. O aluno sabe que uma onda audível, como um "grito", por exemplo, tem alcance muito pequeno, e que uma onda de radiofreqüência, mesmo de pouca potência, percorre centenas de quilômetros. Fazendo com que essa onda de RF transporte o "grito", ele terá seu campo de atuação alargado. Isto é o que se verifica nas transmissões radiofônicas, onde a onda portadora de freqüência elevada transporta a onda moduladora, que pode ser o sinal de um microfone, fonocaptador, câmera de TV, etc.

No receptor, a onda portadora é **eliminada**, ficando-se somente com a onda de informação (moduladora), que nos interessa.

II - Tipos de modulação

As três características de uma onda que podem ser modificadas são: **amplitude, freqüência** e **fase**. De acordo com aquela que for modificada, ter-se-ão os processos de modulação denominados de: **modulação de amplitude, modulação de freqüência e modulação de fase**.

A modulação de amplitude é a mais utilizada. As emissoras que o aluno recebe em seu aparelho de rádio (OM, OC, etc.) são moduladas em amplitude (AM). Nas emissões de televisão, a onda portadora de informação de imagem é modulada em amplitude e a onda portadora de som é modulada em freqüência (FM).

Vamos apresentar alguns detalhes dos sistemas de modulação, começando pelo de amplitude.

a) Modulação de amplitude

Tal sistema consiste em modificar a amplitude da onda portadora. É o tipo de modulação utilizado em todas as emissoras de radiodifusão comerciais, que o aluno recebe em seu receptor comum de rádio. Estamos chamando de receptor comum à classe de receptores não especiais, dentro da qual situamos os receptores para freqüência modulada, banda lateral única, etc.

Suponha o aluno que um oscilador gere uma onda de radiofreqüência, como a mostrada na **figura 25**, onde se percebe
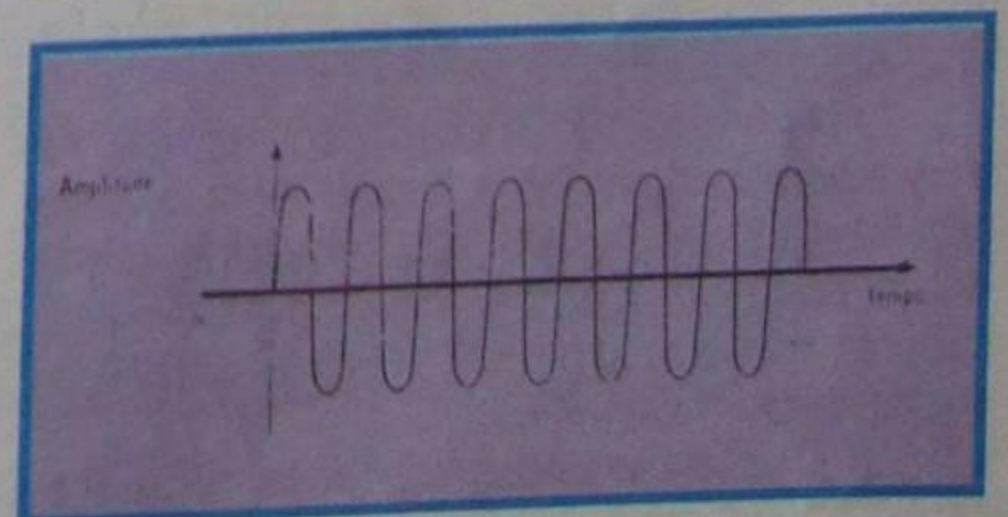
Figura 25 - Exemplo de onda de RF.

que a amplitude é constante. Suponha, agora, que um gerador de áudio produza

uma onda retangular, como a mostrada na **figura 26**. Se introduzirmos no oscilador
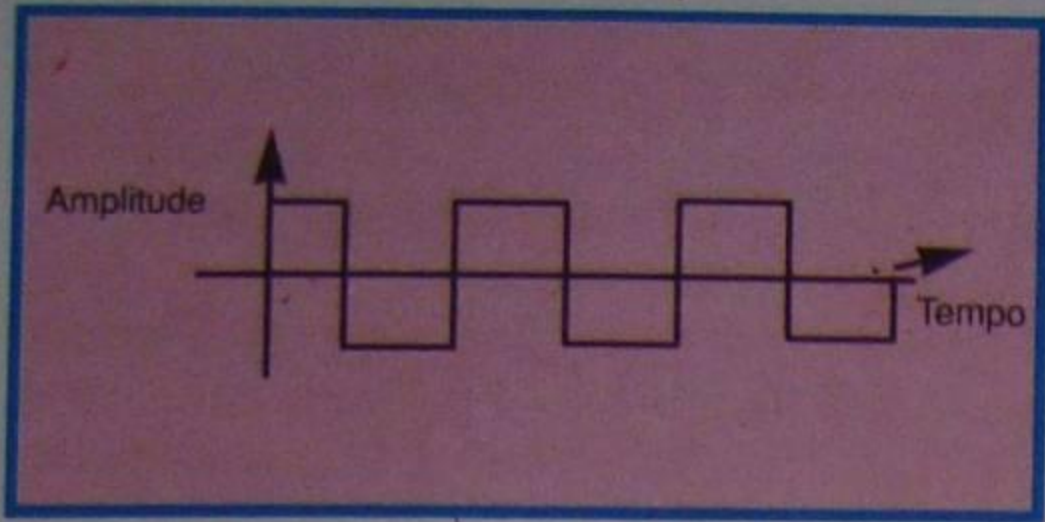
Figura 26 - Exemplo de onda de áudio (retangular).

de RF a onda retangular do gerador de BF, teremos na saída uma onda como a mostrada na **figura 27**, ou seja, a onda de
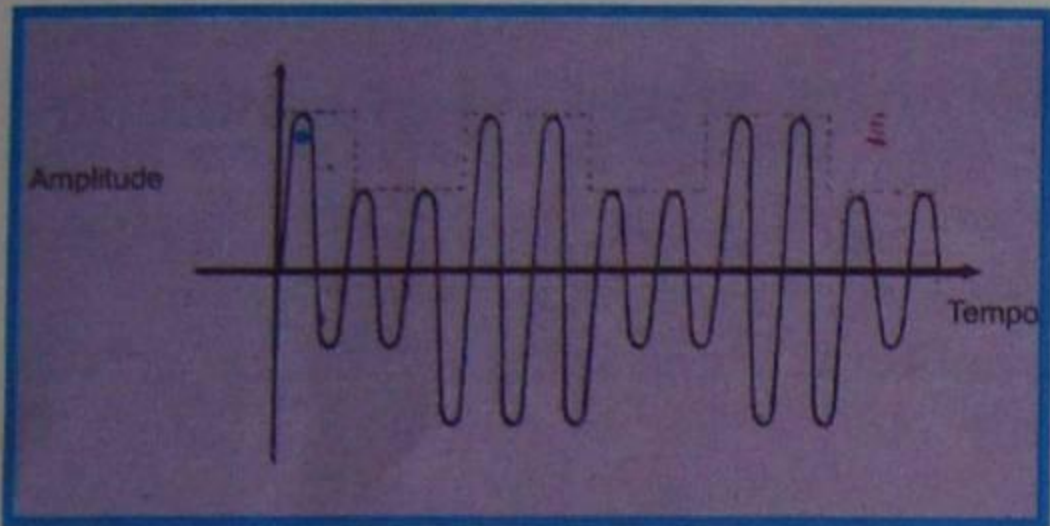
Figura 27 - Onda de RF modulada em amplitude.

RF modulada pela onda de BF. Percebe-se, pela figura 27, que os picos da onda modulada seguem a variação de amplitude da onda moduladora, como indicamos por linhas tracejadas. Essa linha é chamada de **envolvente de modulação**. Na recepção do sinal, o que interessará é, somente, a envolvente da modulação, como veremos mais adiante, em nosso curso.

b) Faixas laterais e largura de faixa

Quando aplicamos uma onda modulante de uma única freqüência, por exemplo 1 000 Hz, a uma onda portadora, digamos de 1 000 KHz, o sinal de RF resultante estará formado por três freqüências distintas, a saber:

1ª - a freqüência da onda não modulada (portadora), denominada de **freqüência central**.

2ª - uma freqüência correspondente à **diferença** entre a freqüência central e a de modulação, denominada **freqüência lateral inferior**;

3ª - uma freqüência correspondente à **soma** da freqüência central com a de modulação, denominada **freqüência lateral superior**.

No nosso exemplo, onde a freqüência central é de 1 000 KHz e a da portadora é de 1 000 Hz, teríamos, além da freqüência central de 1 000 KHz, a lateral inferior de 999 KHz e a lateral superior de 1 001 KHz.

Demos o exemplo com uma freqüência de modulação de tom único de 1 000 Hz, para ficar mais fácil o entendimento da questão, entretanto, o aluno pode imaginar agora que a onda modulante é gerada pelo sinal de áudio de uma orquestra, que produz todos os tons audíveis, desde 16 a 16 000 Hz. Neste caso, não se têm mais duas freqüências laterais singelas, como no exemplo anterior, e sim uma coleção de freqüências correspondentes à soma e diferença da freqüência central com a de cada tom produzido pela orquestra. Essa coleção de freqüências define as **faixas** ou **bandas laterais**. No exemplo, a faixa lateral inferior abrange todas as freqüências, desde 1 000 KHz - 16 000 Hz até 1 000 KHz - 16 Hz, ou seja, a faixa lateral inferior vai de 984 KHz a 999, 984 KHz.

A faixa lateral superior vai de 1 000 KHz + 16 Hz a 1 000 KHz + 16 000 Hz, ou seja, de 1 000,016 KHz a 1016 KHz.

O intervalo de freqüência, entre a freqüênica mais baixa da faixa lateral inferior e a mais alta da faixa lateral superior, é chamado de **largura de faixa** ou de **banda** ou, ainda, de **canal**.

No nosso último exemplo, a largura de faixa corresponde a 32 000 Hz.

Uma emissora de rádio para transmitir todas as freqüências do espectro de áudio, deverá ter largura de banda de, no mínimo, 40 000 Hz. Como a largura total da faixa de ondas médias é de 1 070 KHz (1 605 - 535 KHz), podemos concluir que, nela, só caberiam cerca de 27 emissoras (1 070 ÷ 40 KHz). Entretanto, comprovou-se que, para a inteligibilidade da palavra falada e da música, basta um intervalo de freqüência de poucos Hertz até cerca de 4 500 Hz; então, distribui-se a cada emissora um canal de 10 KHz, sendo que a modulação só pode atingir 9 KHz, ou seja, 4,5 KHz em cada faixa lateral. O meio quilohertz restante em cada faixa lateral é para garantir a separação entre emissoras, isto é, para evitar que a modulação de uma interfira com as das imediatamente vizinhas. Com esta restrição de canal é possível colocar 107 emissoras na faixa de ondas médias, sem que haja interferência entre elas. Evidentemente,existem mais de 107 emissoras na faixa de ondas médias, portanto, mais de uma emissora trabalhando na mesma freqüência, isto é perfeitamente possível, desde que a distância entre elas seja grande e suas potências tais que não haja interferência mútua. Na faixa de ondas curtas (6 a 18 MHz) cabem 1 200 emissoras com canal de 10 KHz, como o aluno pode calcular facilmente.

c) Porcentagem de modulação

Na modulação de amplitude, como o aluno pode verificar na figura 27, a onda **moduladora** faz variar a **amplitude** da portadora, aumentando-a ou reduzindo-a. A quantidade em que a portadora é reduzida ou aumentada costuma ser indicada por uma relação entre a amplitude da onda moduladora e da onda portadora. Essa relação é chamada de **fator de modulação**.

Quando esse fator é indicado em porcentagem, dá-se-lhe o nome de **porcentagem de modulação** ou **profundidade de modulação**. Assim, se chamarmos de A_m a amplitude da moduladora e A_p à da portadora, poderemos escrever que a profundidade de modulação **m** é:

$$m = \frac{A_m}{A_p} \times 100\%$$

As amplitudes tanto podem ser indicadas em tensão, como em corrente.

Exemplo: Se a amplitude da onda modulante for de 3 V e a da portadora for de 10 Volts, a profundidade de modulação será de:

$$m = \frac{3}{10} \times 100\% = 0,3 \times 100\% = 30\%$$

Quando a profundidade de modulação é muito grande, há muita distorção do som detetado (recebido pelo rádio); por isso, ela deve ser mantida dentro de, aproximadamente, 30 a 70%. Nas emissoras comerciais, a profundidade de modulação é de aproximadamente 30%.

Para que o aluno tenha uma idéia do que acontece se a profundidade de modulação é muito grande, na **figura 28**, mostramos uma onda modulada com m = 30%, e a envolvente que seria detetada no receptor; na **figura 29**, apresenta-
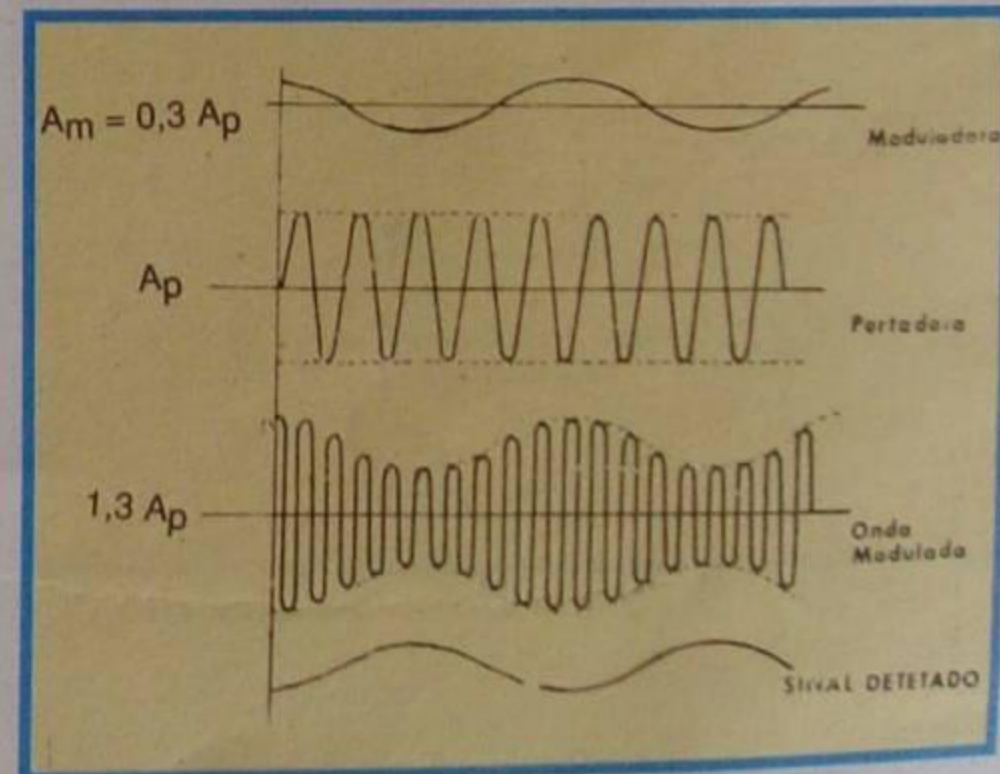
Figura 28 -Formas de ondas (m = 30%).
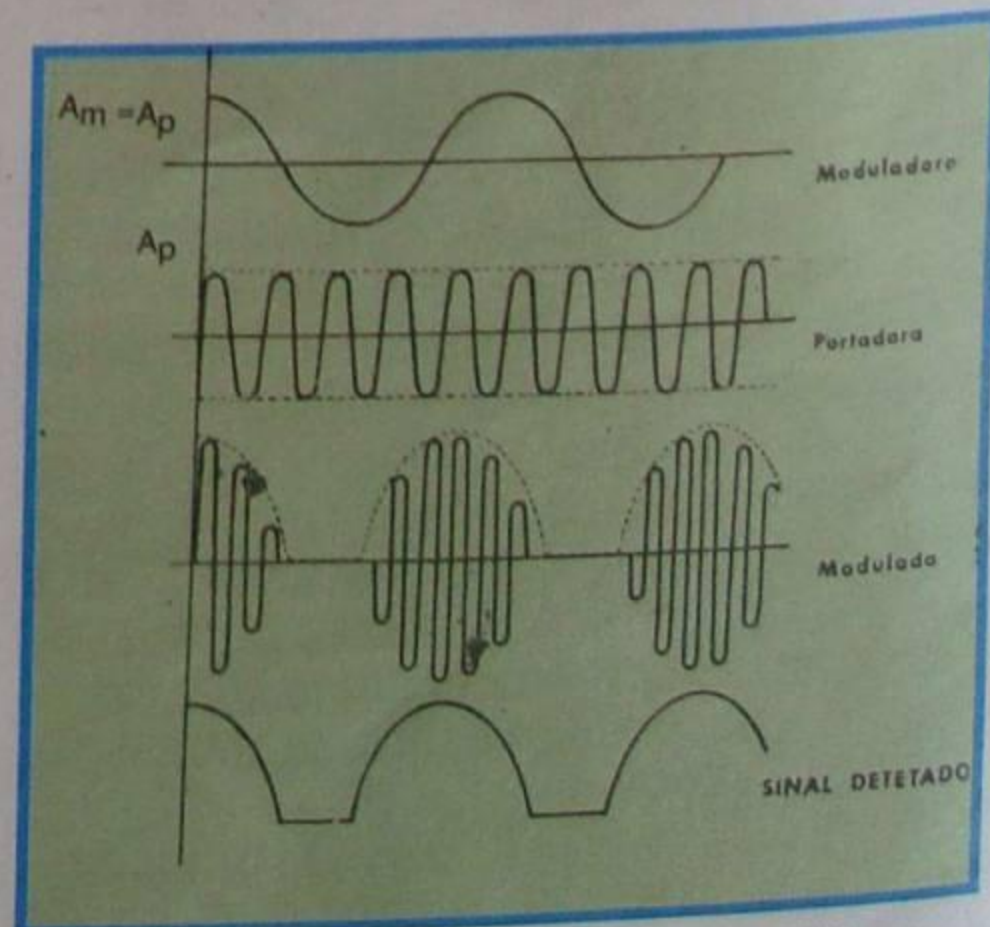
Figura 28 - Formas de ondas (m = 100%).

mos a mesma situação, se a profundidade de modulação fosse de 100%. Observe como se modifica a forma da envolvente.

Quando **m** é maior que 100%, diz-se que há **sobremodulação.**

d) Sistemas de modulação de amplitude

A onda portadora de um transmissor é gerada em um oscilador eletrônico, de qualquer dos tipos que já descrevemos. Para modular essa onda, injetamos no próprio oscilador ou, no estágio de saída do transmissor, que está ligado à antena, o sinal proveniente de uma fonte qualquer, como um microfone, fonocaptador, etc. Há várias maneiras de modular a onda portadora, dependendo da potência do transmissor, sendo mais utilizadas as seguintes:

1ª) Modulação direta

É o tipo mais simples: consiste em ligar, por exemplo, um microfone em série com o circuito de antena, como mostramos na **figura 30**, onde indicamos o oscilador por um bloco. Este sistema só se aplica a transmissores de reduzida potência, uma vez que a corrente de saída circula também pelo microfone. O microfone mais apropriado para tal fim é o de carvão.

Sabemos que a resistência do microfone de carvão varia sob a ação das ondas sonoras; conseqüentemente, a corrente de RF, na antena, variará na mesma cadência.
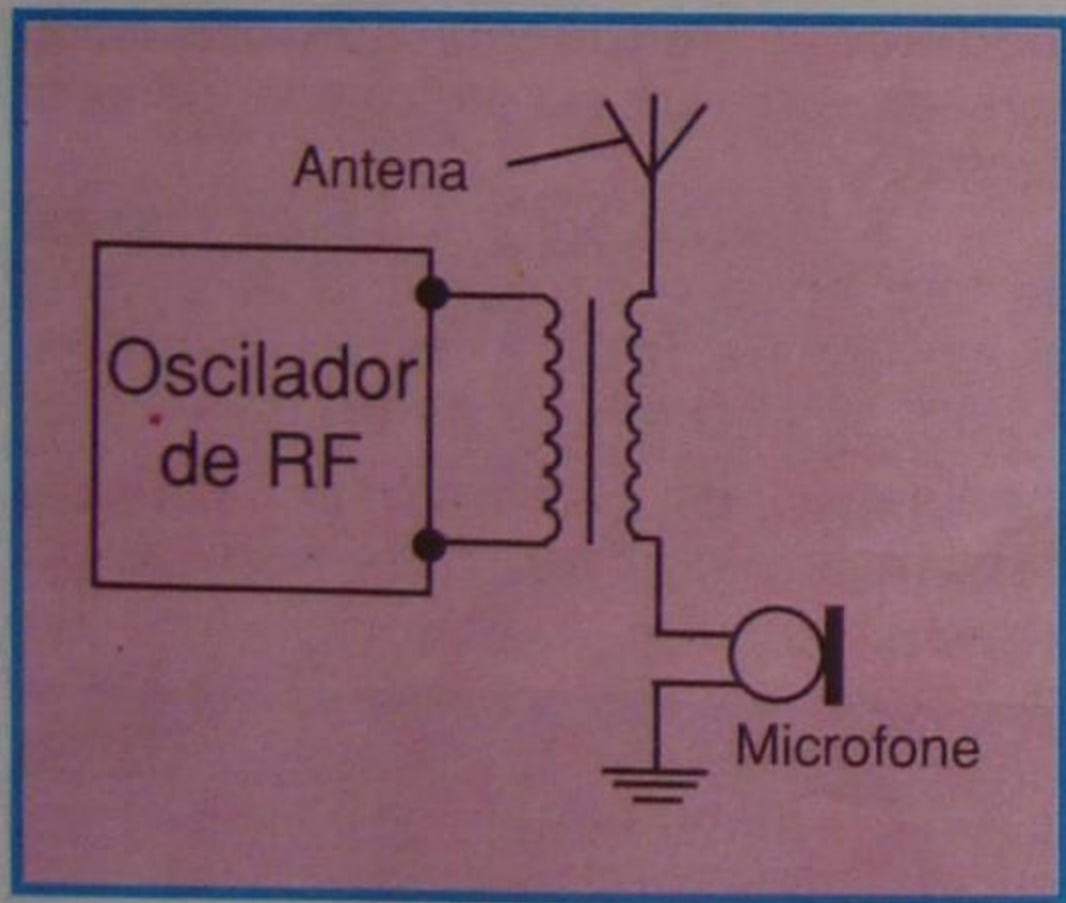
Figura 30 - Circuito com modulação direta.
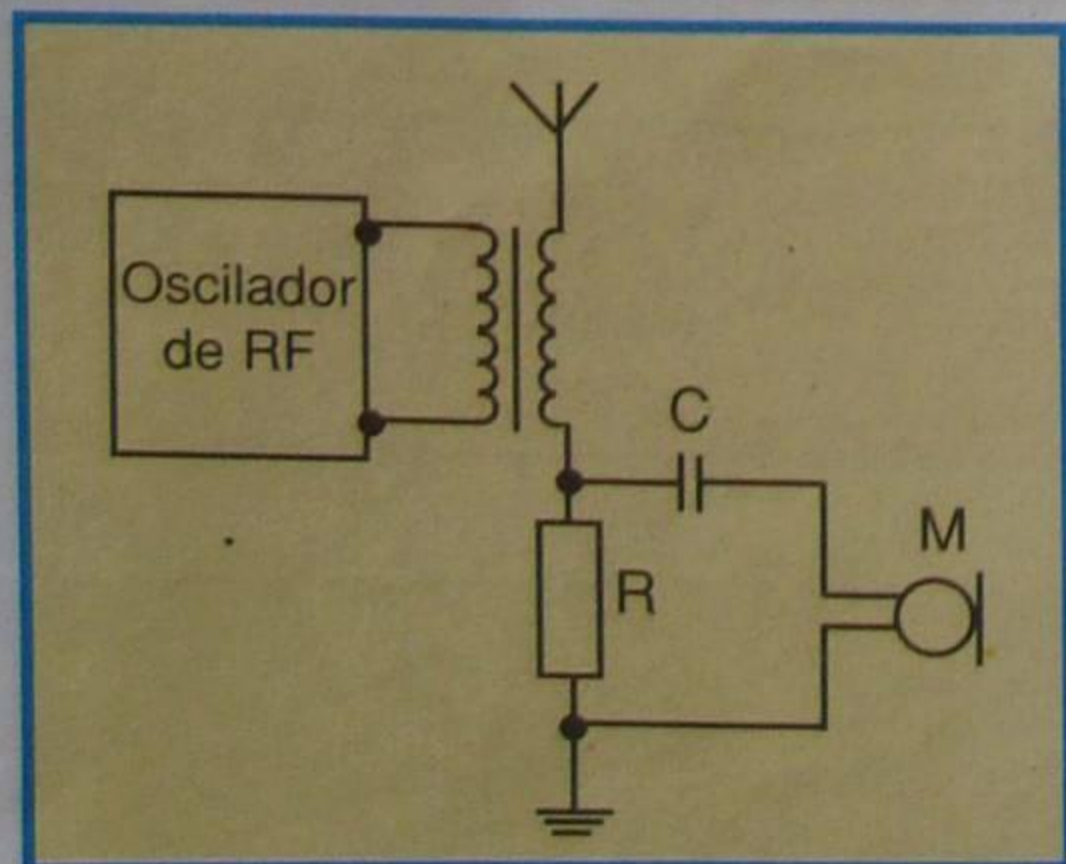
Figura 31 - Variante do circuito da figura 30.

Pode-se modular diretamente uma onda, ligando-se um microfone em paralelo com uma carga que esteja em série com a antena. Neste caso, a tensão gerada pelo microfone constitui a onda modulante, que se somará com a portadora. Essa variante é a que mostramos na **figura 31**.

2ª) Modulação por absorção

Este processo permite modular potência superior ao processo da modulação direta, mas, mesmo assim, só pode ser usado em transmissores de pequena potência. Na **figura 32**, mostramos o esquema de um transmissor modulado em amplitude por absorção. O oscilador é do tipo "Hartley". Acoplado com o circuito oscilante, temos o enrolamento de antena e um secundário, no qual se liga o microfone ou amplificador de microfone. Como o aluno sabe, o microfone ou amplificador, se for o caso, comporta-se como uma resistência, e absorve parte da energia do circuito oscilante (daí o nome de modulação por absorção); pois toda resistência do secundário de um transformador se reflete no primário, e vice-versa. A pressão sonora sobre o microfone faz variar sua resistência e conseqüentemente, a do circuito de antena, no mesmo ritmo, produzindo a modulação.
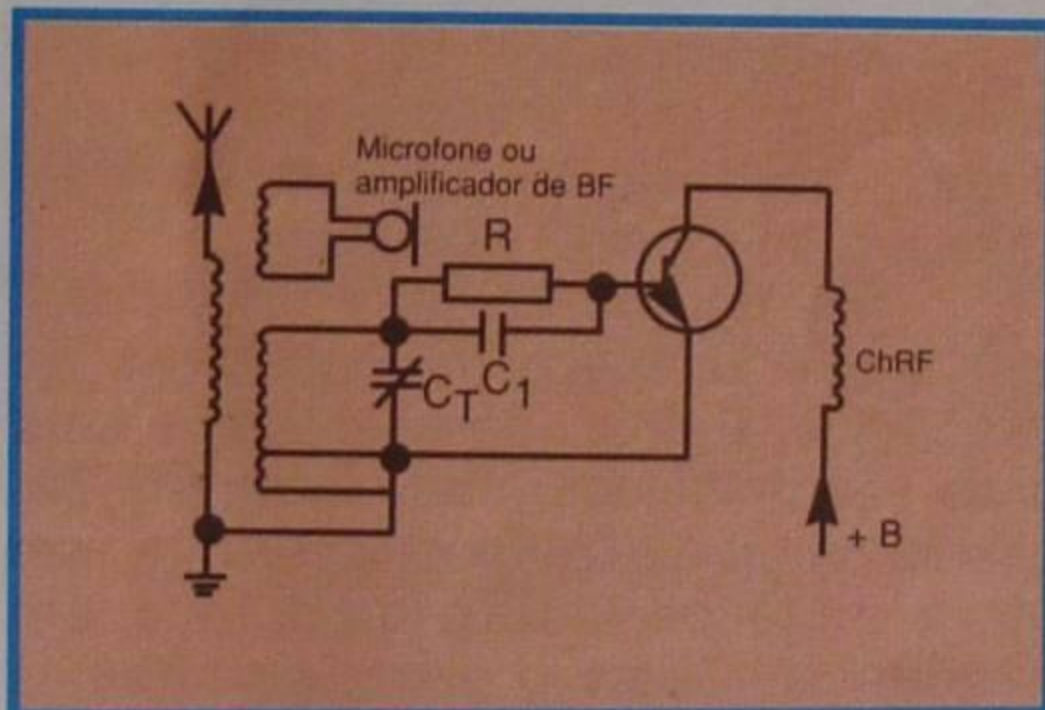
Figura 32 - Transmissor modulado em amplitude por absorção.
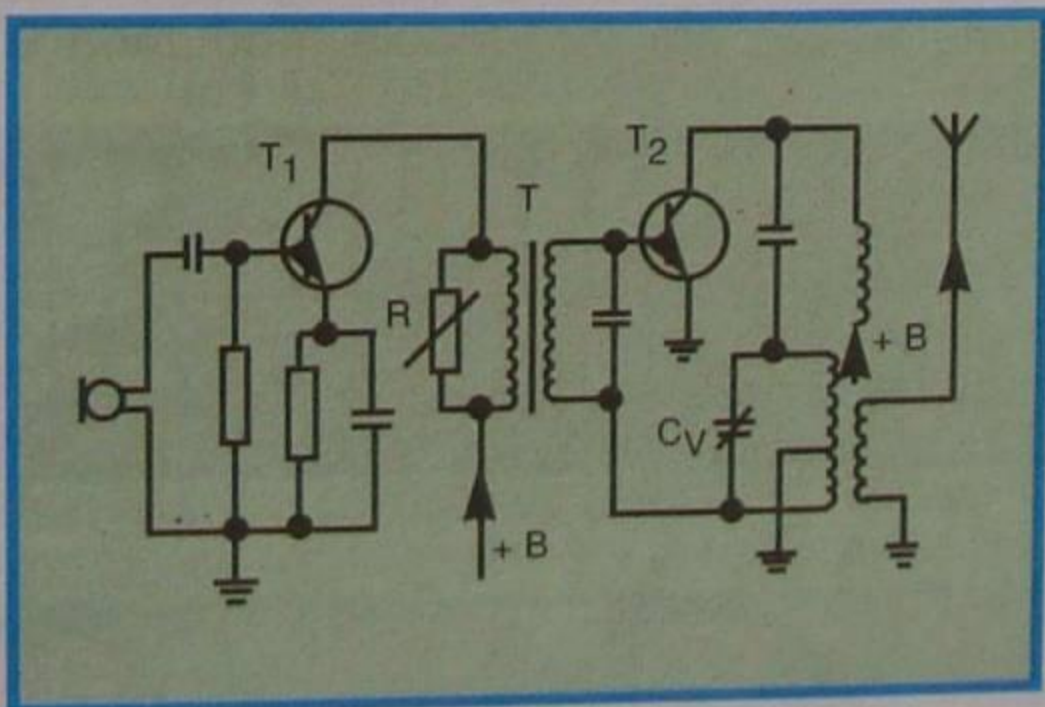
Figura 33 - Oscilador modulado por base.

3ª) Modulação por base

É possível fazer-se com que a onda moduladora atue no circuito de base do transistor oscilador. Neste caso, a modulação é dita **por base**.

A modulação por base permite modular grandes potências de saída. Na **figura 33**, mostramos um circuito típico de um oscilador modulado por base. O transistor T_1 é uma etapa amplificadora de microfone (áudio). O acoplamento entre o transistor T_1 e o oscilador, constituído pelo transistor T_2 e circuito LC, em montagem "Hartley", é feito através do transformador T. O resistor variável R tem por função variar a profundidade de modulação. O princípio de funcionamento desta classe de modulação é, também, bastante simples. De fato, analisando o esquema, percebemos que a tensão de áudio é aplicada à base do transistor oscilador. Aí, a onda portadora sofre modificações no mesmo ritmo da onda da modulação.

A modulação é limitada pela amplificação do transistor, já que o sinal de modulação deve ter excursão na parte linear da curva de transferência, para que não haja excessiva deformação.

4ª) Modulação por emissor

Neste sistema de modulação, o secundário do transformador de saída TRF está em série com o retorno do emissor do transistor, como mostramos na **figura 34**. Aí colocamos o modulador no emissor da etapa amplificadora de RF, através do transformador TRF_2, mas ele poderia estar situado diretamente no emissor da osciladora.

Este método de modulação é muito usado em transmissores de pequena potência.
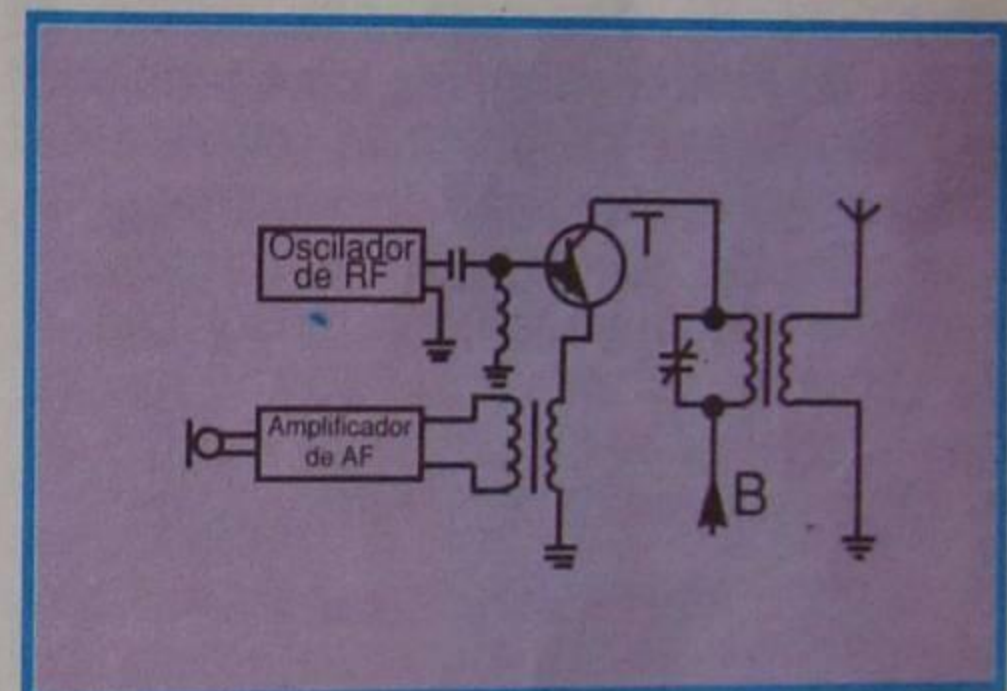
Figura 34 - Circuito para análise.
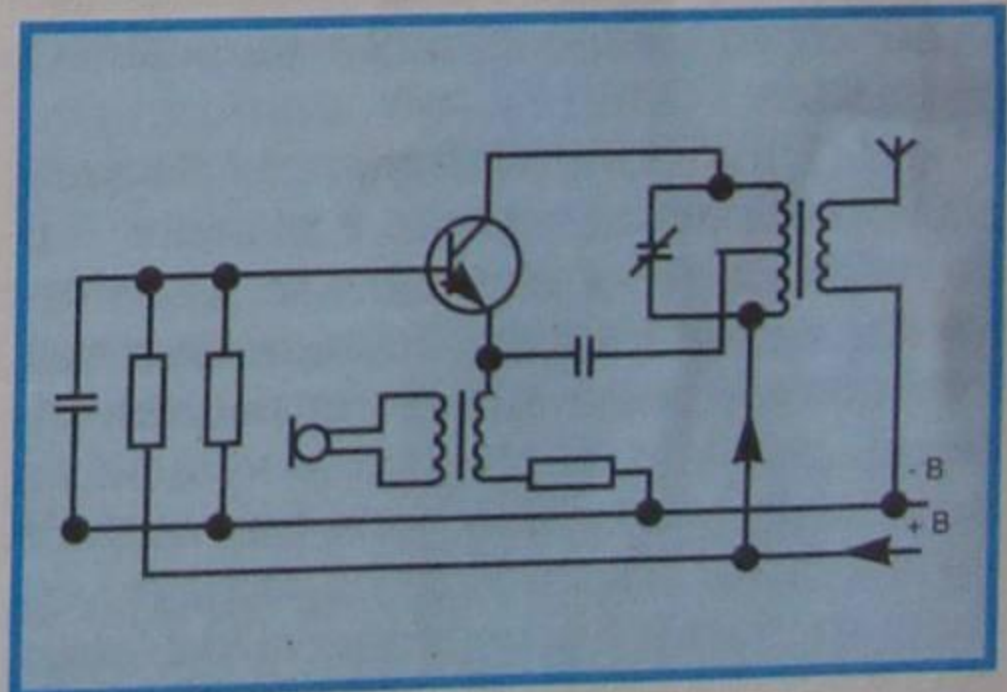
Figura 35 - Variante da figura 31.

Na **figura 35**, apresentamos um circuito básico semelhante para modulação por emissor.

5ª) Modulação por coletor

De todos os sistemas de modulação que se conhecem, o mais difundido e o que melhores resultados apresenta é o de **modulação por coletor**; por isso, ele é extensamente usado, tanto em pe-

quenos transmissores, como nos grandes.

Seu princípio consiste em juntar, à tensão contínua de coletor do transistor oscilador, a tensão de áudio de modulação, o que se consegue intercalando o modulador entre a fonte de alimentação e o coletor do oscilador ou do transistor que se deseja modular.

Geralmente, a tensão de modulação se aplica por meio de um transformador, que acopla os coletores do amplificador de áudio à carga do transistor oscilador ou amplificador de RF, como mostramos na **figura 36**.
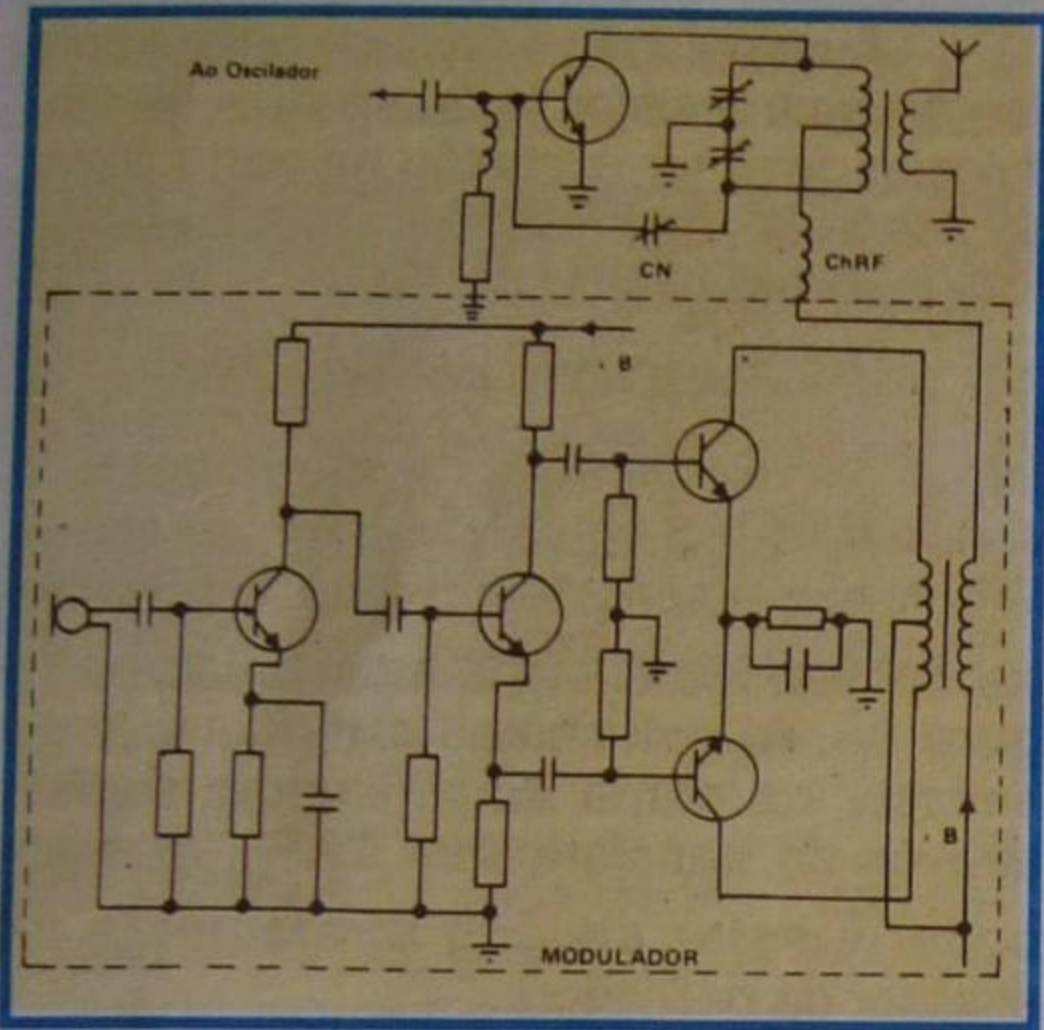
Figura 36 - Modulação por coletor.

Neste sistema de modulação, o modulador deve ser capaz de aplicar, à etapa de radiofreqüência, uma potência igual à **metade** da potência de corrente contínua de alimentação dessa etapa. Por exemplo, se a corrente de coletor do transistor, onde se aplica a modulação, é de 100 mA sob tensão de 500 V, resulta que a potência de corrente contínua, extraída da fonte de alimentação, é de:

$$P_{CC} = 500 \times 0{,}1 = 50 \text{ W}$$

Nestas condições, o amplificador de áudio empregado como modulador deve ser capaz de liberar, na saída, potência de 25 W.

O transformador utilizado no acoplamento entre o estágio modulador e **o** de saída de RF é chamado de **transformador de modulação**. Trata-se de transformador de áudio que difere do convencional, pelo fato de ter grande número de espiras no secundário, uma vez que ele deve adaptar a impedâcia de carga do estágio modulador à impedância de carga do amplificador de RF, e esta é, normalmente, elevada.

A impedância de carga do secundário pode ser facilmente calculada, desde que se conheçam a tensão e a corrente contínua do coletor do amplificador (ou oscilador) de RF.

No exemplo que demos, a impedância do secundário do transformador de modulação deverá ser de:

$$Z = \frac{500}{0{,}1} = 5\,000\ \Omega$$

pois, como vimos, a tensão de coletor é de 500 V e a corrente é de 100 mA (ou 0,1 A).

Se for utilizada no modulador uma etapa de saída, em contrafase com carga, coletor a coletor, de 5 000 Ω, a relação de espiras do transformador deverá ser de:

$$N = \sqrt{\frac{Z_p}{Z_{sec.}}} = \sqrt{\frac{5\,000}{5\,000}} = 1$$

o que significa que o primário deverá ter o mesmo número de espiras que o secundário.

No projeto dos transformadores, devem-se reduzir ao máximo possível as perdas, o que se consegue utilizando núcleos especiais e outras medidas que fogem ao assunto em pauta. É de se observar que, pelo secundário, circula corrente elevada; isto pode causar a saturação do núcleo e, como conseqüência, deformação do som. Este inconveniente se evita enrolando-se o secundário em oposição, ou seja, de maneira que o fluxo magnético produzido por uma parte do enrolamento seja oposto ao produzido pela outra parte, de modo a se anularem, exatamente como acontece nos transformadores de áudio em contrafase.

III - Modulação de freqüência

A modulação de freqüência consiste em variar a freqüência de uma onda portadora, de acordo com as variações de um sinal modulador.

Nas **figuras 37, 38** e **39**, mostramos o que acontece na modulação de freqüência. Em 37, apresentamos uma onda não modulada (portadora); em 38, uma onda de áudio (moduladora); e, em 39, a onda portadora modulada em freqüência. Como o aluno percebe, a amplitude da onda **permanece constante** ao longo da transmissão.

A grande vantagem da transmissão em freqüência modulada é ser **menos** sensível aos ruídos, uma vez que eles se manifestam **sempre** como variação de amplitude. Devemos acrescentar, entretanto, que a eficiência da modulação em freqüência depende, quase que inteiramente, do receptor, pois caberá a ele limitar a amplitude do sinal e, conseqüentemente, eliminar o ruído.

a) Faixas laterais e índice de modulação

A transmissão em freqüência modulada (abrevia-se FM) pode ser feita em qualquer freqüência; entretanto, em nosso país foi reservada a faixa de 88 a 108 MHz (VHF) para as transmissões comerciais de FM.

A cada emissora foi distribuído um canal de 200 KHz, no qual a modulação pode ocupar, no máximo, 150 KHz, isto é, 75 KHz em cada lado da freqüência central. Deste modo, entre uma emissora e as duas adjacentes (a de freqüência imediatamente superior) há uma separação de 50 KHz, o que evita interferência mútua.

A transmissão de FM na faixa de VHF é de reduzido alcance, pelos motivos que explicamos no capítulo anterior, de modo que são empregadas apenas em transmissões locais e como "links", isto é, ligação entre o estúdio e o transmissor.

Dada a grande largura de faixa do canal de FM, as transmissões são feitas aproveitando-se todo o espectro de áudio, o que permite emissões de alta fidelidade monaural (um canal), e estereofônicas (dois canais).

A modulação, como vimos, modifica a freqüência da portadora, fazendo com que ela se "desvie" do valor central.

A relação entre o desvio máximo de freqüência e a freqüência de áudio é chamada de **índice de modulação**. Assim, se chamarmos de m_f o índice de modulação, de Δf o máximo desvio de freqüência e de **f** a freqüência de áudio,
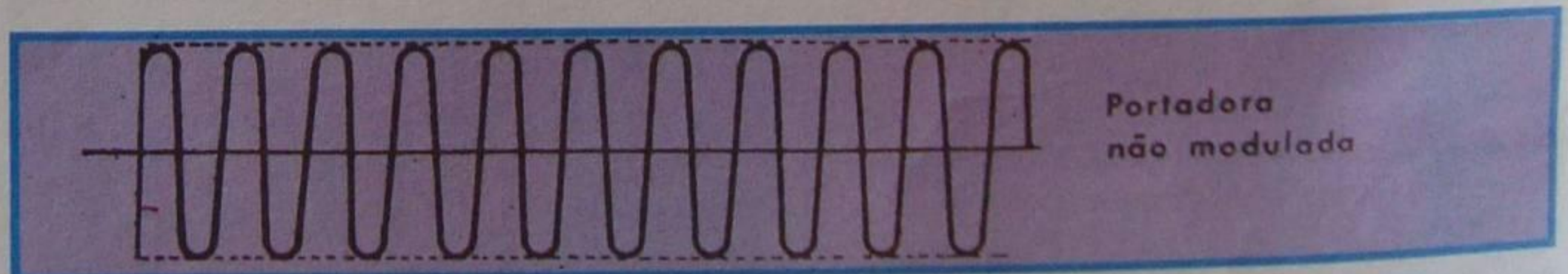
Figura 37 - Portadora de FM.
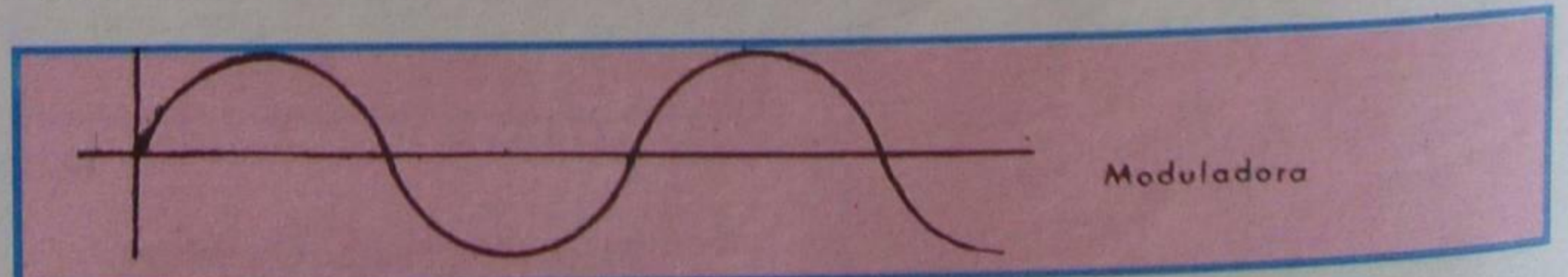
Figura 38 - Sinal de áudio modulante.
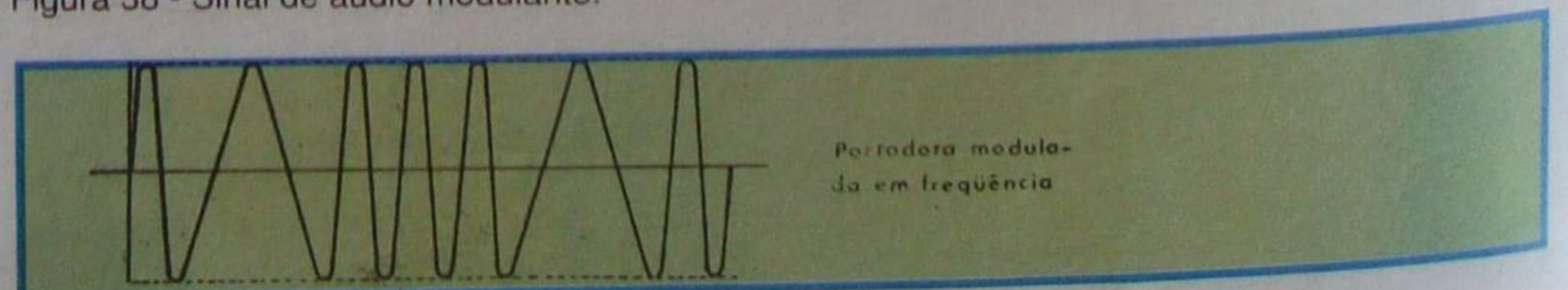
Figura 39 - Sinal modulado em freqüência.

resultará:

$$m_f = \frac{\Delta f}{f}$$

No caso das emissoras comerciais de FM, Δf = 75 KHz, como vimos, e o índice de modulação para a maior freqüência de áudio considerada como 15 KHz será:

$$m_f = \frac{75\ KHz}{15\ KHz} = 5$$

É fácil de ver que, para os valores mínimos da freqüência de áudio, o índice de modulação aumenta. Para o caso extremo de f = 15 Hz, o índice de modulação será:

$$m_f = \frac{75\ 000\ Hz}{15\ Hz} = 5000$$

O índice de modulação varia, também, com a intensidade do sinal modulante. Quanto mais intenso o sinal, maior será o índice de modulação. Por outro lado, o sinal de áudio é mais intenso nas freqüências baixas; logo, podemos afirmar que o **índice de modulação varia inversamente com a freqüência.** Para evitar esse inconveniente, os moduladores de FM devem possuir circuitos que igualem os sinais, isto é, que aumentem os agudos e diminuam os graves. Esses circuitos são chamados de **equalizadores**.

b) Modulador transistorizado de reatância

Um dispositivo simples e satisfatório para a modulação de FM, em transmissores de potência reduzida, é o modulador transistorizado de reatância. O transistor de reatância tem a propriedade de modificar a impedância de saída, tornando-a indutiva ou capacitiva, de acordo com a tensão aplicada à sua base. Aplicando à base uma tensão variável como a de áudio, por exemplo, a reatância variará na mesma cadência do sinal. Se aplicarmos o sinal de saída do transistor de reatância a um circuito oscilador, sua freqüência se modificará, porque o transistor atua como um capacitor (ou indutor) variável. Haverá, portanto, modulação em freqüência.

Na **figura 40**, mostramos um esquema que ilustra o princípio de funcionamento de um modulador em freqüência transistorizado de reatância.
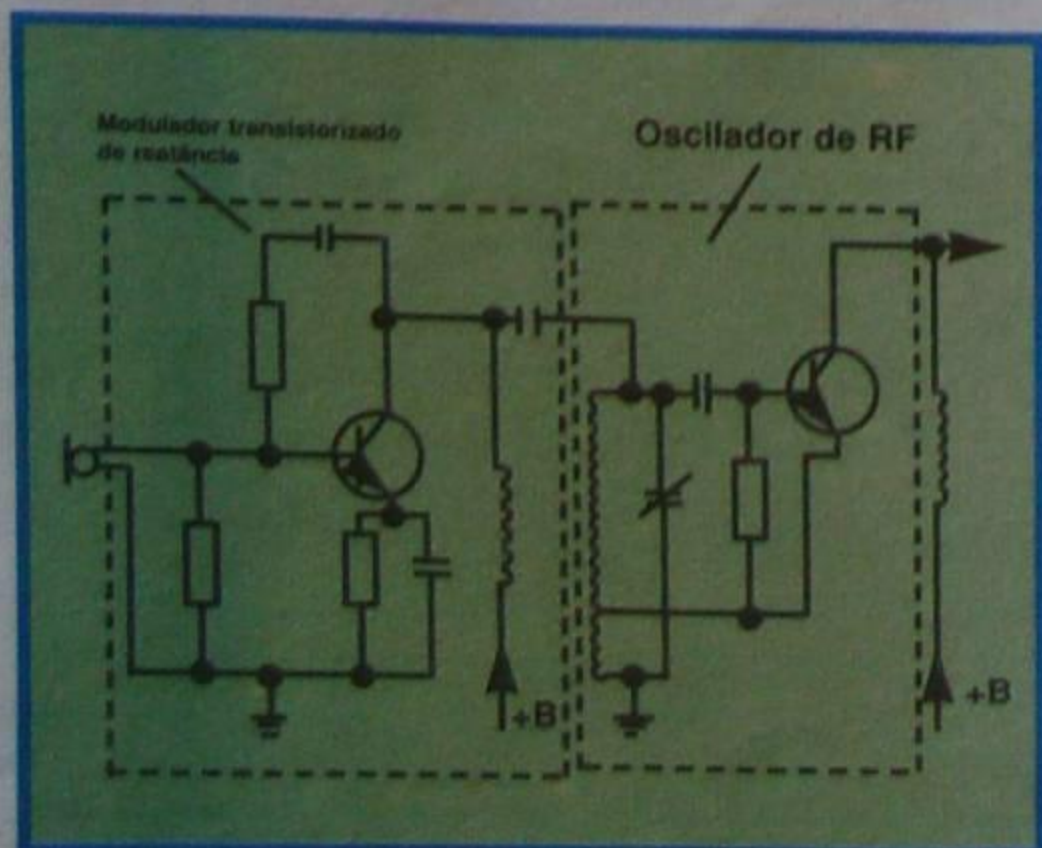
Figura 40 - Modulador de reatância.

IV - Modulação de fase

Neste método modifica-se a fase da corrente no circuito e, com isso, se modifica a freqüência, de modo a ter, a modulação de fase, a mesma forma que a de freqüência, sendo que a diferença entre esses dois tipos de modulação reside apenas na definição.

Amplificadores de Radiofreqüência

Na lição teórica, enfatizamos a importância do amplificador de radiofreqüência, tanto na transmissão como na recepção dos sinais de rádio. Procuramos chamar a atenção do aluno para a semelhança **formal** que existe entre o amplificador de audiofreqüência e aquele de radiofreqüência e, ao mesmo tempo, mostrar as diferenças de ordem prática entre eles, diferenças essas conseqüentes do comportamento diferente que os elementos constitutivos do amplificador apresentam, quando se eleva a freqüência.

Aqui, insistiremos um pouco mais no assunto, complementando-o com detalhes de caráter prático.

Em outra parte de nosso curso, quando faremos a aplicação dos princípios da eletrônica, que vimos estudando quanto ao caso específico da recepção de ondas eletromagnéticas, mostraremos mais algumas particularidades da amplificação de RF.

I - Circuitos de RF

Mostraremos, ao aluno, alguns circuitos de amplificadores de radiofreqüência, de uso generalizado na técnica de recepção de ondas eletromagnéticas.

1º) Circuitos de entrada de receptores

Na **figura 41**, mostramos o circuito de entrada, chamado de **circuito de antena**. O transistor T cumpre as funções de oscilador e misturador também, mas, no momento, o que nos interessa é, exclusivamente, sua função de amplificador de radiofreqüências.

Figura 41 - Circuito de antena.

Todo sinal que chega à antena é transferido ao circuito RLC série, no caso, constituído pela indutância L_S, capacitância C_V e resistência própria do enrolamento L_S, que não figura no desenho. Na realidade, L_A e L_S formam um transformador de RF conhecido como **bobina de antena**. Na **figura 42**, mostramos o aspecto da bobina de antena para a faixa de ondas médias. Variando-se a capacitância de C_V, o circuito RL_SC_V entra em ressonância com uma das freqüências presentes no primário. Para essa freqüência, a tensão recolhida nos terminais de C_V, que constitui a tensão V_S de sinal aplicada à base do transistor é máxima. Desse modo, o circuito seleciona a emissora que se quer ouvir. O sinal V_S será amplificado pelo transistor e recolhido na carga Z. No circuito apresentado, o sinal amplificado sofre uma redução de freqüência, e a carga Z fica sintonizada com essa freqüência, como veremos em outra lição. O importante, agora, é atentarmos para o circuito amplificador, que é constituído pela bobina de antena, transistor amplificador e carga Z.

Figura 42 - Bobina de antena.

Como o aluno pode observar, o primário da bobina de antena é "frouxamente" acoplado ao secundário L_S. Normalmente, o fator de acoplamento está entre 0,2 a 0,3. Isto significa que apenas 20 a 30% do sinal do primário é transferido ao secundário. A razão de acoplamento tão baixo será estudada no momento oportuno. Por ora, podemos adiantar que é por razões de seletividade, melhora da relação sinal/ruído, evitar a irradiação do sinal do oscilador local, etc.

2º) Amplificador de RF

Muitas vezes é utilizado amplificador de RF, para aumentar a sensibilidade e/ou a seletividade de um receptor.

O circuito clássico do amplificador de RF é aquele que mostramos na **figura**

43. Este circuito permite aumentar a sensibilidade e, também, a seletividade.

Chamamos de sensibilidade a capacidade que tem o receptor de receber os sinais fracos, e de seletividade, a capacidade de selecionar, ou seja, separar as emissoras recebidas.
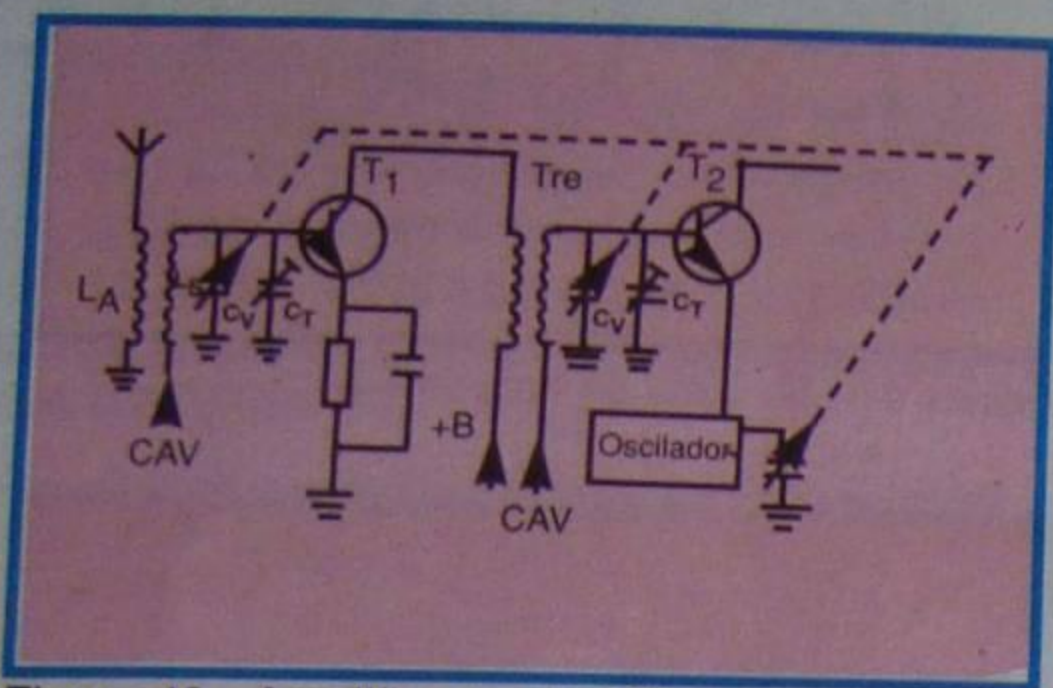
Figura 43 - Amplificador de RF.

No circuito da figura 43, a sensibilidade é aumentada porque o sinal de entrada, recolhido pela antena e transferido para a base do transistor T_1, através da bobina de antena, é amplificado por esse transistor. A seletividade é melhorada devido à existência do circuito sintonizado TRF (transformador de radiofreqüência), que atua como carga do transistor amplificador.

O transistor T_2 desempenha a mesma função que descrevemos para o circuito da figura 41. Note que, para facilidade de desenho, indicamos o circuito oscilador por um bloco, e colocamos o capacitor variável fora do bloco.

Devemos esclarecer que, tanto na figura 41 como na figura 43, a sintonia do circuito ressonante é variada através do capacitor variável; entretanto, é perfeitamente possível fixar-se o valor do capacitor e variar a indutância. Isto se consegue, fazendo a modificação da posição do núcleo ferromagnético do interior da bobina. Na **figura 44**, mostramos o esquema do amplificador de RF e oscilador de um receptor, que adota o sistema de sintonia por variação de indutância, enquanto que na **figura 45** ilustramos um bloco de sintonia de auto-rádio que se utiliza deste sistema.

Figura 44 - Sintonia por variação de indutância.

3º) Amplificador de FI

A amplificação de freqüência intermediária, ou seja, da freqüência resultante da mistura da freqüência do sinal de entrada com aquela gerada no oscilador local, é efetuada por amplificador de RF periódico, sintonizado na freqüência de FI.

Na **figura 46**, mostramos o circuito típico do amplificador de freqüência intermediária. Os transformadores de acoplamento são chamados, como o aluno já sabe, de transformadores (ou bobinas) de FI. O amplificador de FI é aquele desenhado entre as duas linhas tracejadas: o transistor T_1 é o oscilador-misturador e seu circuito pode ser aquele da figura 41, onde a carga Z é substituída pelo transformador 1º TFI. O elemento de ligação entre a saída de T_1 e a entrada de T_2, que é o amplificador de FI, é o transformador sintonizado no valor da FI. Podemos adiantar, desde já, que esse valor é de 455 KHz para os receptores de AM (amplitude modulada), e de 10,7 MHz para os receptores de FM, (freqüência modulada). O sinal amplificado é recolhido no transformador de FI, 2º TFI, sintonizado na mesma freqüência do 1º TFI, sendo, posteriormente, detetado, como estudaremos na próxima lição.

O amplificador de FI é responsável pela maior parte da **amplificação** do sinal de entrada e, também, pela **seletividade** do receptor.

Figura 46 - Circuito amplificador de FI.

II - Outros circuitos transistorizados de RF

Mostraremos em seguida, outros circuitos transistorizados de RF.

1º) Entrada de receptores

Na **figura 47**, mostramos um circuito típico da entrada de radiofreqüência de um receptor transistorizado. Percebe-se que há 3 enrolamentos na bobina de antena, em lugar dos dois do circuito que mostramos na figura 41.

O funcionamento desse circuito é o seguinte:

As ondas eletromagnéticas, das mais diversas freqüências, chegam à antena e vão para a terra (chassi) através do enrolamento L_A. Essas freqüências são induzidas no enrolamento L_S, que é sintonizado pelo capacitor variável C_V. Assim, o circuito ressonante RL_SC_V, sendo R a resistência do enrolamento L_S, seleciona a emissora que se quer receber. Uma vez selecionada, essa emissora é transferida à base do transistor T_1 através do enrolamento L_a. Nesse transistor, o sinal sofre amplificação juntamente com a conversão de freqüência. O sinal amplificado é recolhido na carga Z, que na figura é um transformador de FI.

Os enrolamentos L_A e L_S desempenham as funções já estudadas, quando apresentamos o esquema da figura

Figura 45 - Bloco de sintonia de auto-rádio.

Figura 47 - Circuito de entrada de RF.
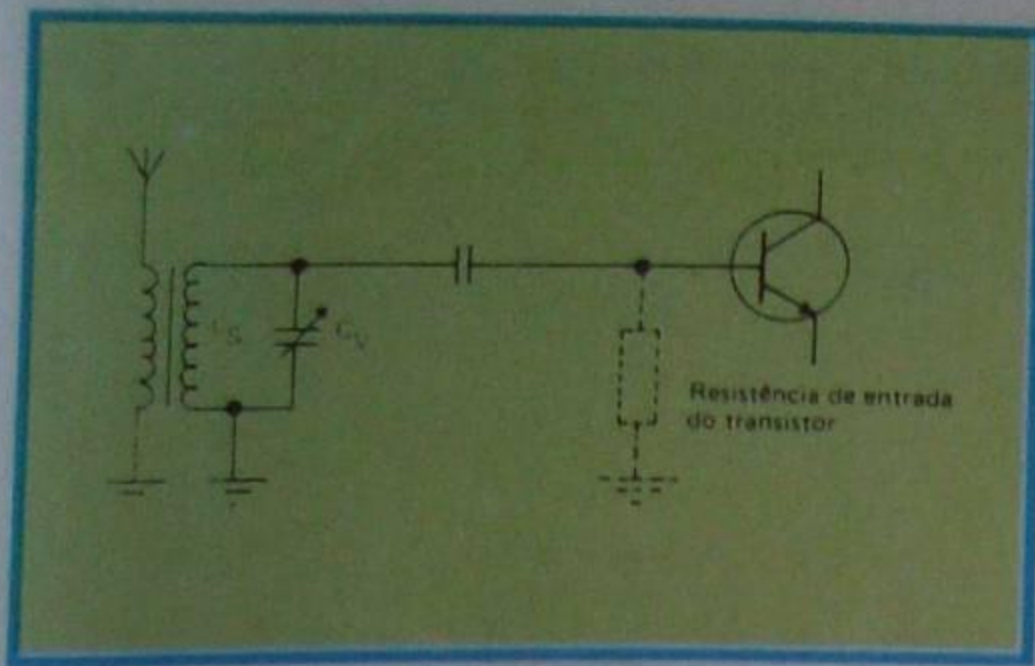
Figura 48 - Necessidade do enrolamento L_a.
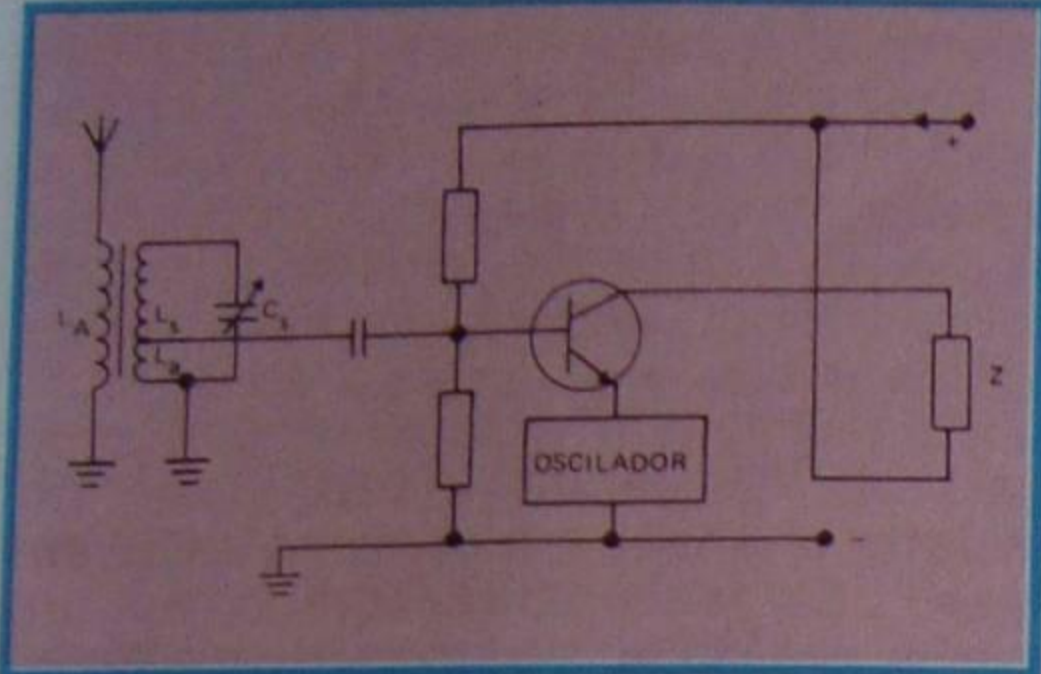
Figura 49 - Variante do circuito da figura 47.

41. A função do enrolamento L_a é a de "casar" a impedância do circuito sintonizado com a resistência de entrada do transistor.

Se o secundário sintonizado fosse ligado diretamente na base do transistor, desapareceria a seletividade, porque, sendo baixa a resistência de entrada do transistor, e estando em paralelo com o enrolamento sintonizado, como mostramos na **figura 48**, ela, resistência de entrada, amortece as oscilações, ou seja, diminui o Q. Para evitar que isso aconteça, é necessário utilizar o enrolamento L_a. Com isso, a resistência de entrada é refletida no circuito ressonante e multiplicada pelo quadrado da relação de espiras dos enrolamentos L_s e L_a. Escolhendo-se, adequadamente, o valor da relação de espiras, limita-se a influência da resistência de entrada do transistor, no amortecimento do circuito sintonizado.

No esquema da figura 47, os enrolamentos L_s e L_a formam um transformador de RF de enrolamentos separados; entretanto, é comum, na prática utilizar-se o autotransformador, como mostramos na **figura 49**.

2º) Amplificador de RF

A **figura 50** apresenta o esquema de um estágio amplificador de RF periódico, ou seja, sintonizado. Assim se consegue aumentar tanto a seletividade, como a sensibilidade do receptor. O transistor T_1 é o amplificador de RF e T_2, o oscilador-misturador. O sinal amplificado por T_1 é injetado na base de T_2 através do transformador de RF, que designamos por TRF, na figura. A necessidade do secundário do transformador se prende à necessidade de "casar" a impedância do circuito ressonante com a resistência de entrada do transistor T_2.
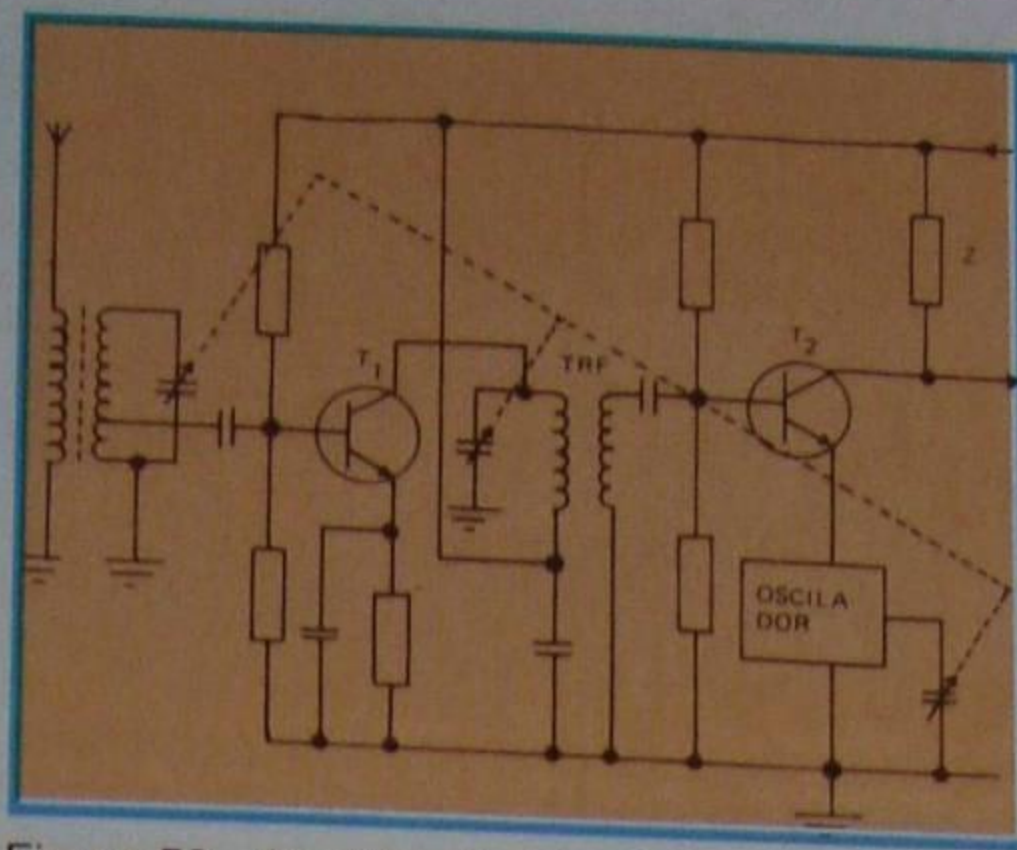
Figura 50 - Amplificador de RF periódico
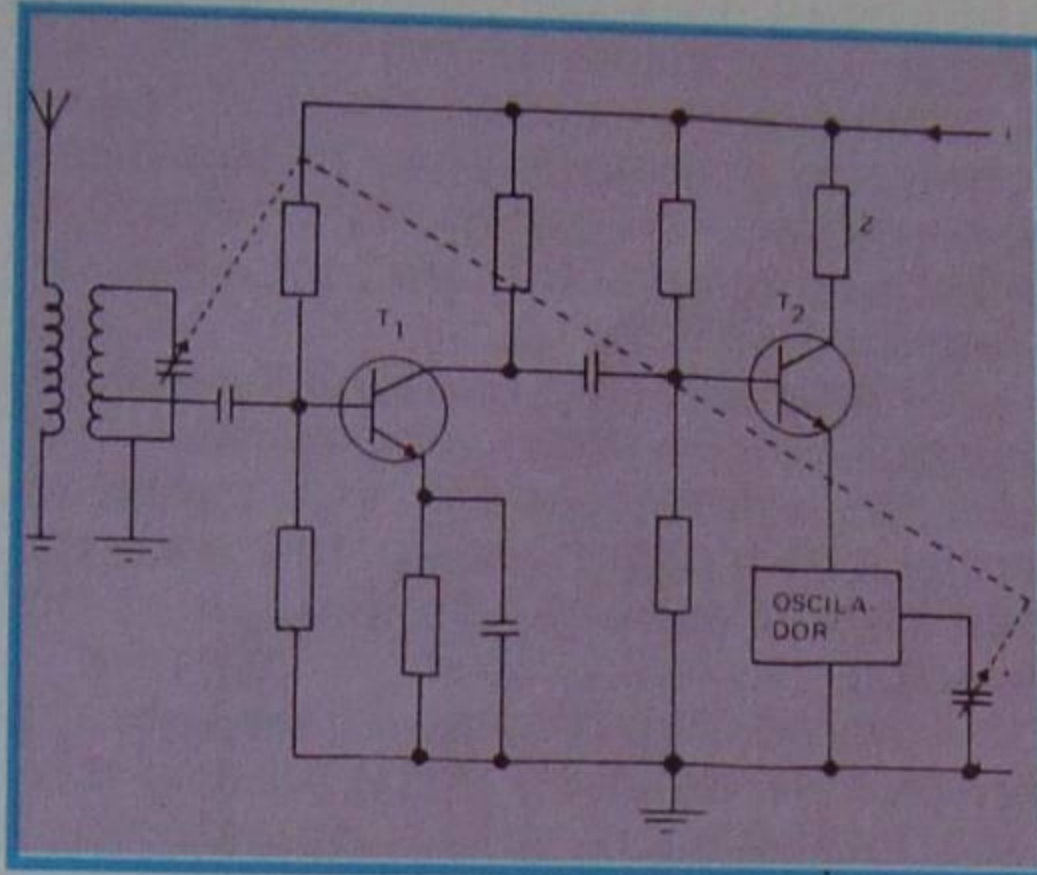
Figura 51 - Amplificador de RF aperiódico.

A **figura 51** apresenta um estágio amplificador de radiofreqüência aperiódico, ou seja, em que a carga de coletor **não é sintonizada**. O amplificador desse tipo, como é óbvio, aumenta apenas a sensibilidade do aparelho.

Nos estágios amplificadores, onde entrada e saída são sintonizadas na mesma freqüência, é muito comum aparecerem oscilações espúrias, que comprometem o desempenho do circuito; por isso, são necessários cuidados especiais, tanto no desacoplamento de RF para terra, como na disposição dos elementos do circuito.

3º) Amplificador de FI

O circuito típico de um estágio amplificador de freqüência intermediária transistorizado é visto na **figura 52**. Como se pode notar, ele pouco difere daquele mostrado na figura 46. Sua função é exatamente a mesma, ou seja, amplificar uma freqüência fixa, com uma banda passante bem determinada. Em razão disso, os amplificadores de FI são chamados, também, de **filtro de banda.** No circuito da figura 52, pode-se notar que o secundário dos transformadores de TFI não é sintonizado. O motivo para assim ser é a baixa resistência de base dos transistores, a qual, como já vimos, amortece o circuito sintonizado.

III - Amplificação de potência de RF

Todos os circuitos apresentados até aqui mostram amplificadores de tensão de
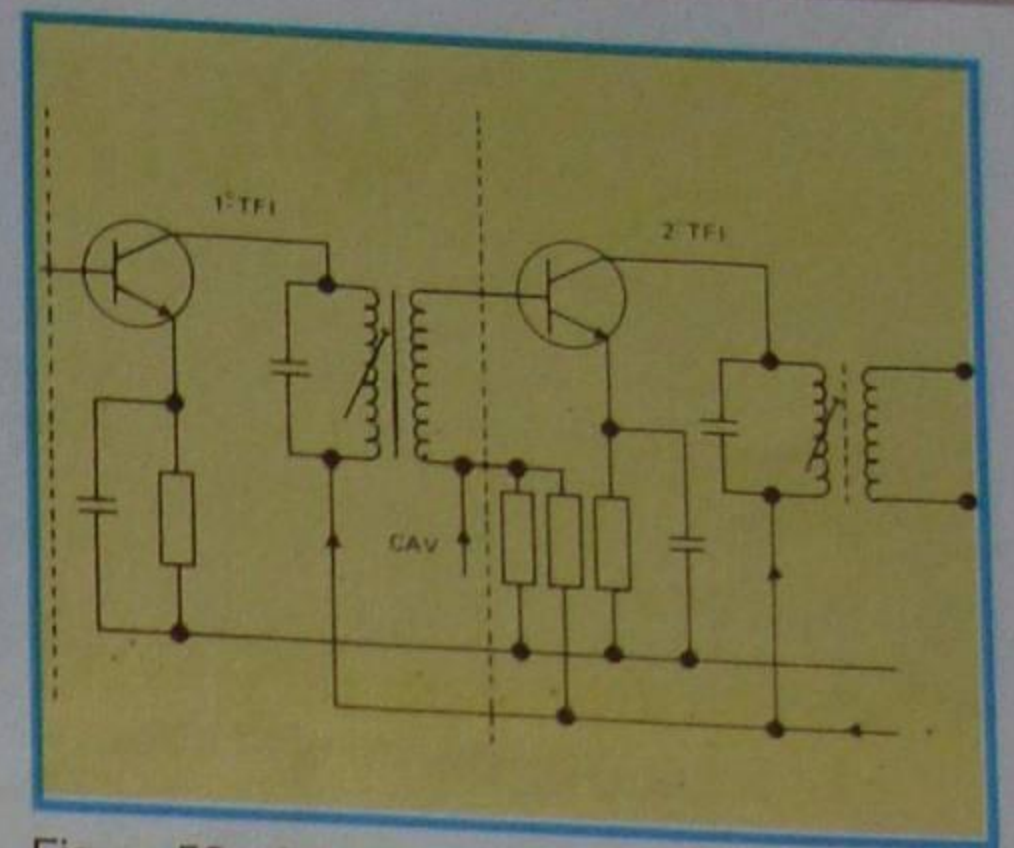
Figura 52 - Amplificador de FI.
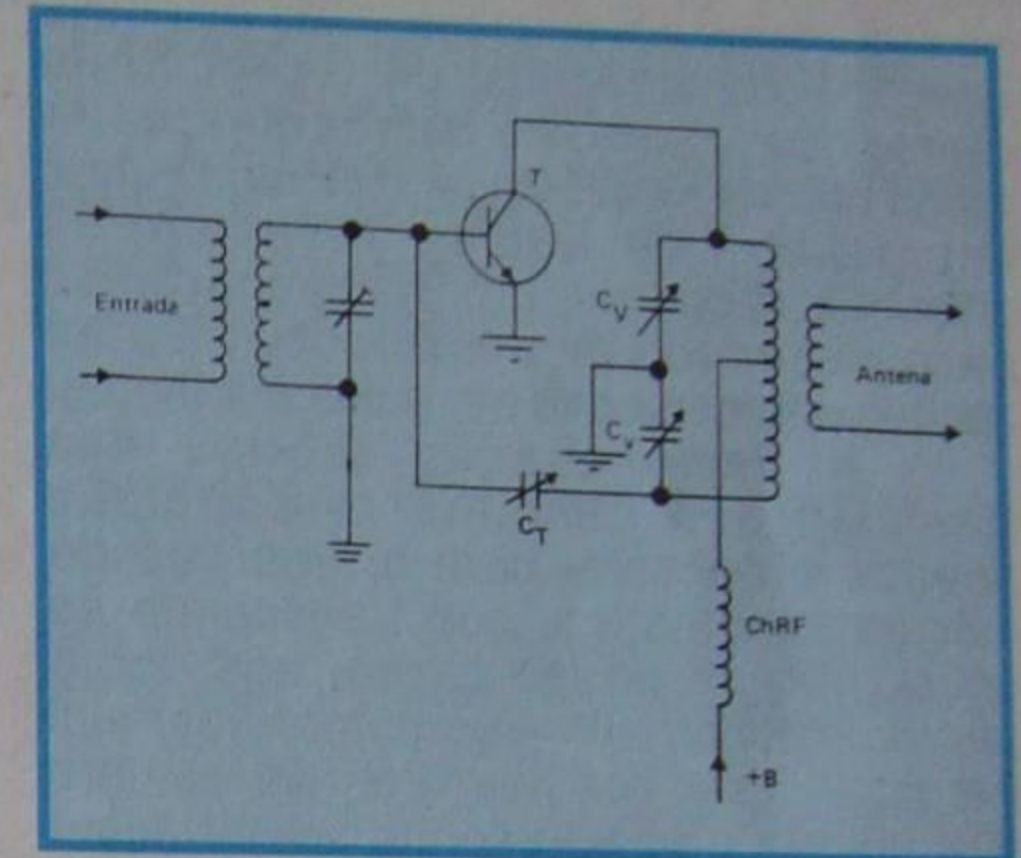
Figura 53 - Amplificador de potência de RF.

RF; entretanto, muitas vezes há necessidade de amplificar um sinal de radiofreqüência, em potência. Todos os transmissores, empregam, na saída do sinal, amplificadores de potência de RF. Esses amplificadores pouco diferem dos amplificadores de audiofreqüência, em sua forma.

Na **figura 53**, apresentamos um esquema típico, utilizando um transistor. O sinal de entrada provém de um estágio amplificador denominado **separador**, porque separa o oscilador do estágio de saída, com a finalidade de minimizar a influência deste último sobre o primeiro. Como se observa o circuito de base é sintonizado, e sua sintonia tanto pode ser na mesma freqüência como em freqüências múltiplas (fracionárias) do circuito de coletor. A onda de saída, que será ligada à antena de transmissão, é sintonizada pelos capacitores C_V. O capacitor C_T é de neutralização. O choque de RF, chRF na figura, evita que o sinal de radiofreqüência seja curto-circuitado para terra.

Os amplificadores de RF podem trabalhar em **qualquer** classe de amplificação que estudamos, para os amplificadores de áudio, e também em classe C, que não é usada em audioamplificadores. Esta última classe é preferida na amplificação de grandes potências, devido ao alto rendimento que se consegue.

Na transmissão de potência elevada, o estágio amplificador de potência é quase sempre do tipo "push-pull" (contrafásico).

CURSO DE ELETRÔNICA BÁSICA RÁDIO - TV

14ª LIÇÃO ESPECIAL

CIRCUITOS RESSONANTES (1ª PARTE)

I - Introdução

O conceito de **ressonância** o aluno certamente já assimilou, pois a ele nos referimos em diversas aulas de nosso curso. Toda a técnica de recepção de ondas de rádio se fundamenta no fenômeno da ressonância elétrica. Dada a importância de que se revestem os circuitos ressonantes, aproveitaremos para desenvolver um pouco mais as noções apresentadas em aulas anteriores.

A demonstração teórica das fórmulas dos circuitos ressonantes apenas é possível com o emprego de cálculo matemático, que transcende às limitações de nosso curso, tais como cálculo vetorial, números complexos, etc. Em razão disso nos permitiremos, sempre que necessário, apresentar as fórmulas sem maiores comentários.

Mais uma vez, voltamos a afirmar que esta lição especial, como algumas outras de nosso curso, onde há a imperiosa necessidade de cálculos, tem a finalidade de completar a formação técnica do aluno, mas tais cálculos **não** são indispensáveis à compreensão do fenômeno, embora a facilite enormemente.

II - Insuficiência dos cálculos aritméticos

Antes de entrar no estudo dos circuitos ressonantes, vamos mostrar que o cálculo aritmético é insuficiente para resolver os problemas de corrente alternada. Assim, suponhamos que um indutor, cuja reatância na freqüência da fonte seja de 100 Ω, é ligado em série com um resistor, também de 100 Ω, como mostramos na **figura 1**. Vamos supor que esse circuito seja ligado a uma fonte de CA de 200 Volts. Nestas condições, a intuição nos leva a concluir que a queda de potencial na indutância é a mesma que na resistência, pois ambas têm igual quantidade de Ohms, isto é, a reatância indutiva da bobina é igual à resistência do resistor. Até aqui, está tudo muito certo. Entretanto, a intuição nos induz a acreditar que, se os 200 V se repartem igualmente no indutor e resistor, devemos ter em cada um uma queda de potencial de 100 V. Isto não é verdade. Medindo as diferenças de potencial no indutor e resistor, encontraremos 141 V e não 100 V, como fomos levados a crer. Ora, se somarmos simplesmente essas duas tensões, encontraremos 282 V, e nosso gerador só fornece 200 V. Como explicar o fato, então?

Figura 1 - Circuito para análise.

Simplesmente observando que os valores das tensões não podem ser somados aritmeticamente. Isto acontece porque a corrente no resistor **não está em fase** com a corrente no indutor, como sabemos.

Vamos insistir um pouco sobre o conceito de **defasagem**, para que não fique nenhuma dúvida. Logicamente, antes de esclarecermos o que é **diferença de fase** ou **defasagem**, vamos explicar o que é fase.

a) Fase

Dizemos que dois ou mais acontecimentos **estão em fase**, quando eles se verificam ao mesmo tempo e semelhantemente.

Por exemplo, admitamos que um indivíduo e seu cachorro partam, ao mesmo tempo, de casa e, caminhando lado a lado, atinjam seu destino uma hora depois. Diremos, então, que o indivíduo e o cachorro caminharam **em fase**, porque nenhum deles se adiantou ou atrasou, em relação ao outro.

Examinemos agora um caso semelhante em eletricidade. Suponhamos que um alternador, cuja tensão máxima é de 150 V, seja ligado aos terminais de um resistor de 150 Ω, como mostramos na **figura 2**.

Se ligarmos um medidor de corrente em série com o resistor e um de tensão em paralelo com o gerador, admitindo que a variação da tensão seja lenta, de modo que possa ser seguida no instrumento, verificaremos que, quando a tensão no gerador é 0 V, a corrente no resistor é 0 A; quando a tensão é máxima, ou seja, 150 V, a corrente também é máxima, valendo 1 A (150 V ÷ 150 Ω = 1A). Quando a tensão muda de sentido, ou seja, é negativa, a corrente também muda de sentido. Em resumo, o que vamos observar é que a variação de corrente segue fielmente a variação de tensão do gerador. Diremos, então, que "**no resistor a tensão e a corrente estão em fase**". Se representássemos, em um mesmo gráfico, as variações de tensão no gerador (que é aquela nos terminais do resistor) e a corrente no resistor (que é a mesma que atravessa o gerador), obteríamos a **figura 3**.

Figura 2 - Fase no resistor.
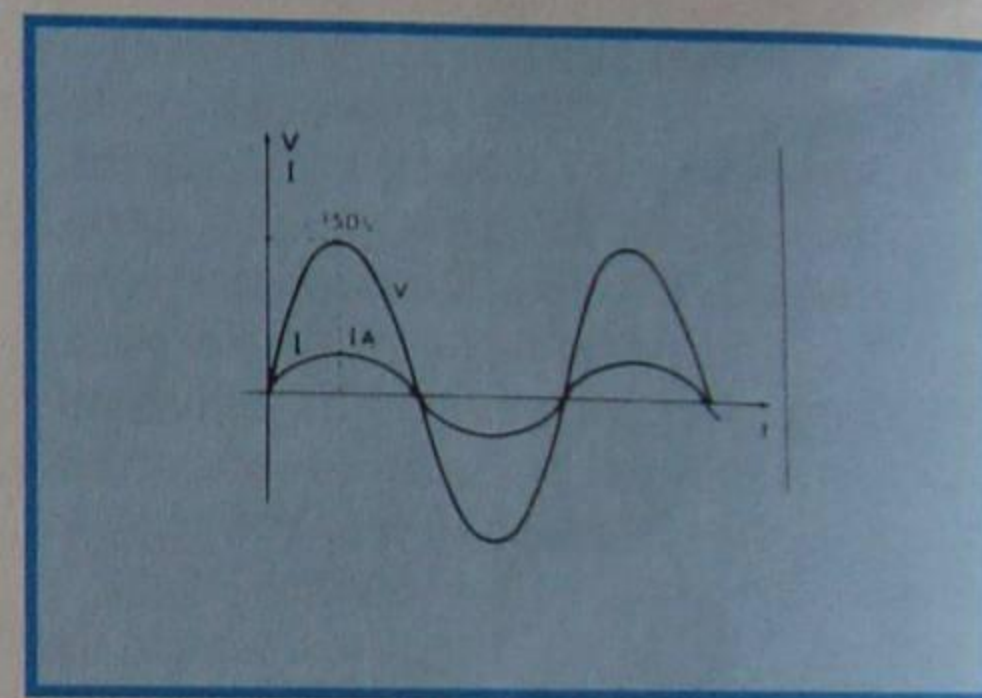
Figura 3 - Gráfico V x I em R.

Obs.: Quando a variação é rápida, utiliza-se o osciloscópio de duplo feixe, ligado no lugar do voltímetro e amperímetro, e, na tela, observam-se diretamente as curvas mostradas na figura 3.

b) Diferença de fase

Diremos que dois fenômenos estão **defasados**, quando são semelhantes, porém não acontecem ao mesmo tempo.

Para exemplificar, admitamos que o indivíduo do exemplo anterior parta 30 minutos antes de seu cão e que os dois caminhem com mesma velocidade e pelo mesmo percurso. É claro que o cão chegará ao seu destino com meia hora de atraso em relação ao seu dono. Diremos, então, que há um atraso ou defasagem de meia hora ou, ainda, que o cão está com diferença de fase de meia hora.

É interessante notar que o sentido da defasagem depende do que se toma como referência. Assim, se tomarmos o cão como referência, diremos que o indivíduo está **adiantado** em relação a ele e, se tomarmos o indivíduo como referência, diremos que o cão está **atrasado**.

Um exemplo de diferença de fase elétrica poderemos ter se imaginarmos dois alternadores iguais ligados em instantes distintos. Assim, suponhamos

que o gerador **B**, da **figura 4**, seja posto em movimento, quando o gerador **A** já tenha completado um quarto de volta.
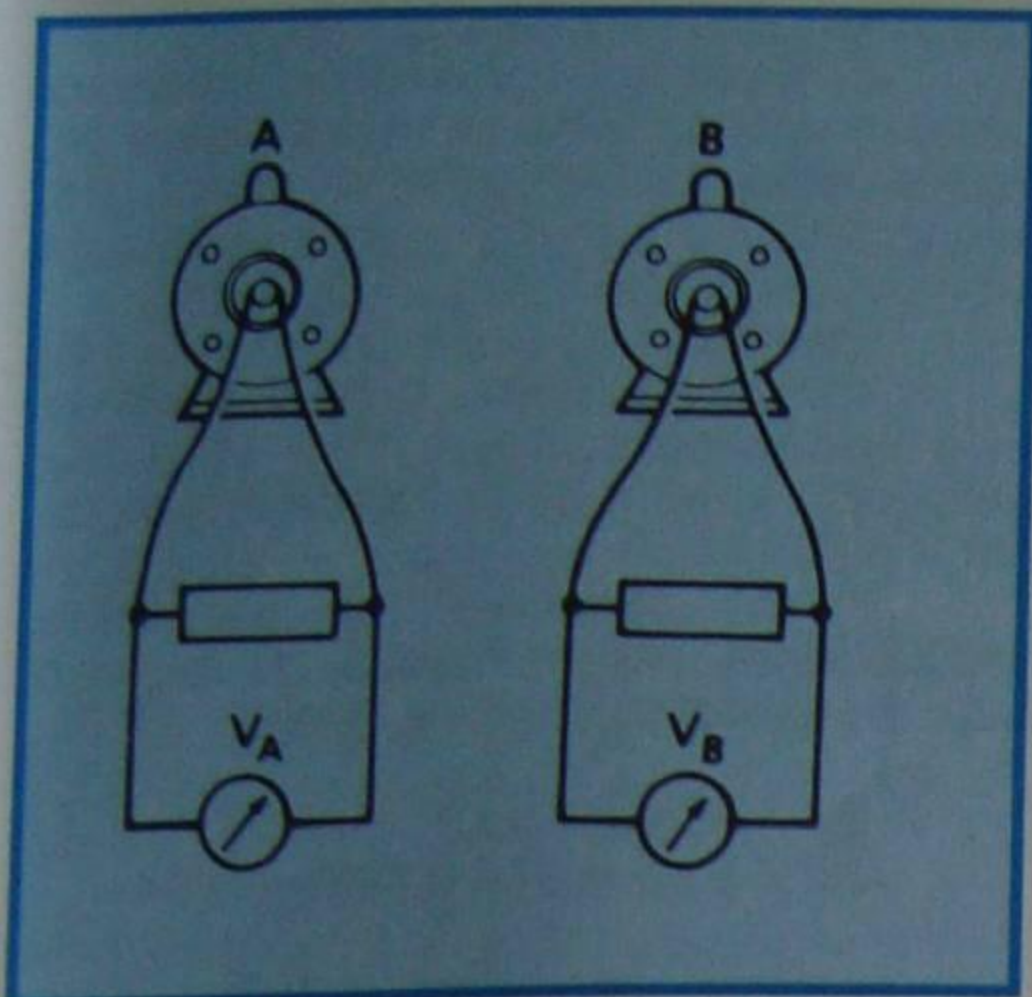
Figura 4 - Comparação entre dois alternadores.

Se representarmos a forma de onda das tensões geradas nos dois geradores, tomando a partida do gerador A como início da contagem dos tempos, encontraremos a **figura 5**.
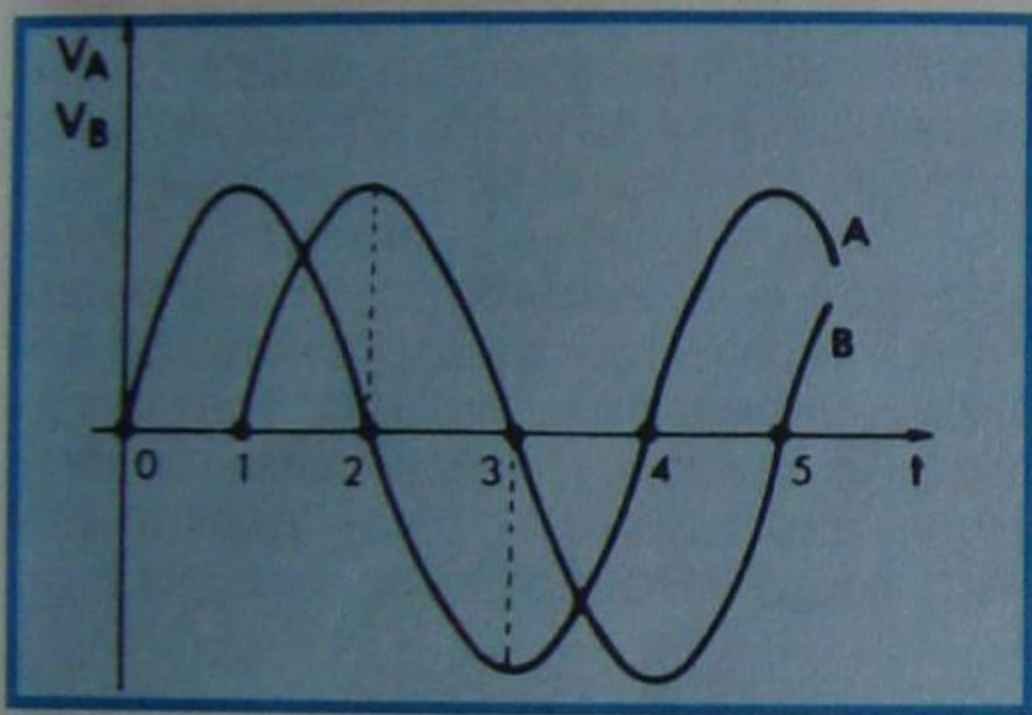
Figura 5 - Formas de onda.

Deve-se observar que, se o gerador B fosse posto em movimento, quando o A tivesse completado uma volta, então a curva de B começaria no ponto 4 do eixo dos tempos, mas coincidiria com a curva de A. Neste caso, **não há** diferença de fase. Voltando ao nosso exemplo do cão e do homem, a situação citada equivaleria àquela em que o homem aguardasse uma ida e volta do cão, até o fim da linha (casa do amigo), e depois partissem novamente juntos.

Em eletricidade, a defasagem é sempre indicada por um ângulo, a que se dá o nome de **ângulo de fase**.

Já citamos em outras aulas, e o aluno deverá lembrar-se sempre, de que:

1ª) Em um indutor ideal, ou seja, sem resistência e sem capacitância, o ângulo de fase entre tensão e corrente é de **90°**, e a corrente está **atrasada** em relação à tensão.

2ª) No capacitor ideal, isto é, sem resistência e sem indutância, o ângulo de fase é de **90°**, mas a corrente está **adiantada** em relação à tensão.

3ª) No resistor ideal, ou seja, sem indutância e capacitância, o ângulo de fase entre tensão e corrente é de 0°, ou seja, tensão e corrente **estão em fase**.

No caso geral de circuitos, dificilmente se tem um capacitor ou indutor ideal e, nesse caso, o ângulo de fase será **diferente** de 90°. É intuitivo que, num circuito contendo um indutor e um resistor, se o valor da resistência for muito maior que o da reatância indutiva, ou seja, o efeito da indutância no circuito for pequeno, então o ângulo de fase se aproximará de 0°. No caso inverso, isto é, a reatância indutiva sendo muito maior que a resistência, então o efeito que predomina é o da indutância e o ângulo de fase se aproximará de 90°. Quando os dois valores são iguais, como aconteceu no exemplo da figura 1, então o ângulo de fase entre tensão e corrente é exatamente a **metade** de 90°, ou seja, 45°.

Como se pode notar, existe uma relação entre o ângulo de fase, a resistência e a reatância. É por causa do ângulo de fase que não se pode somar aritmeticamente as tensões, correntes e reatâncias de um circuito ligado em CA. Isto é o que acontece, também, quando se aplicam forças em um corpo. Assim, se se aplicar em um corpo uma força de 3 toneladas na direção horizontal e 4 toneladas na direção vertical, como mostramos na **figura 6**, observar-se-á que esse corpo não se movimenta nem na direção da força vertical nem da horizontal e, sim, em uma direção intermediária às duas. Por outro lado, a força que efetivamente age sobre o corpo (resultante das duas forças) não será de 7 toneladas (soma aritmética), mas de 5 toneladas (soma vetorial).
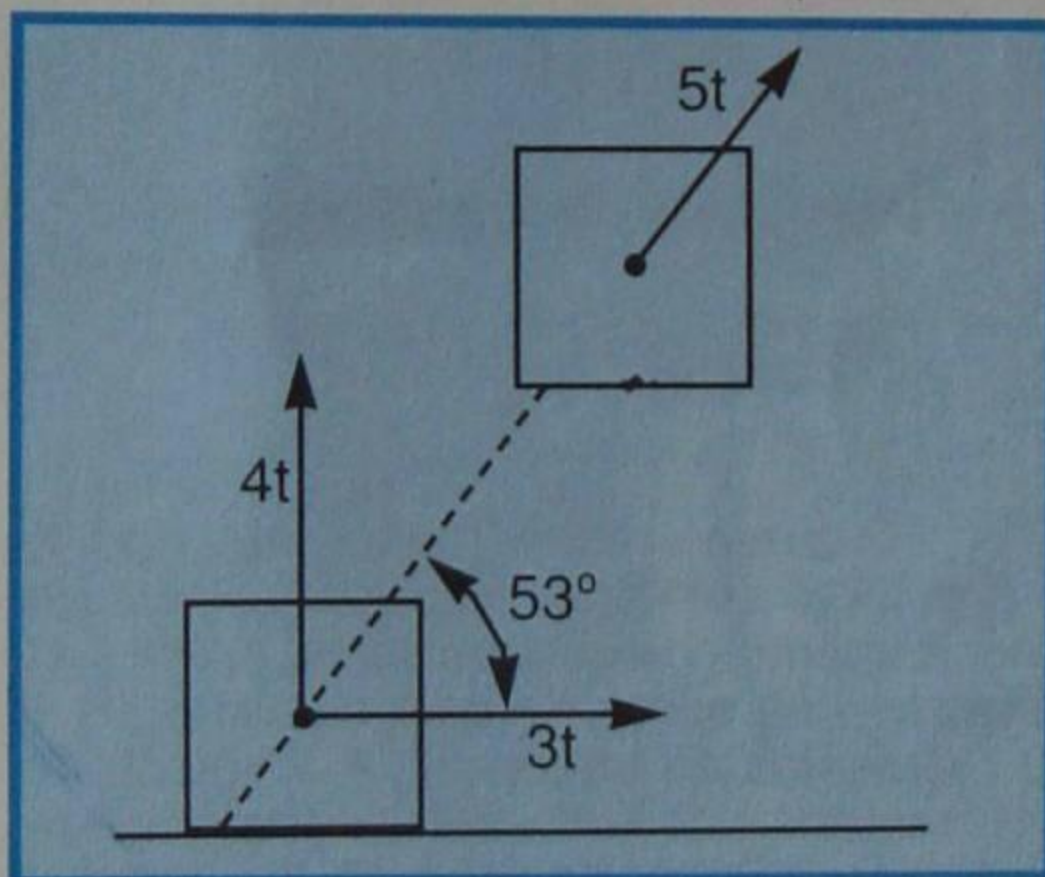
Figura 6 - Exemplo de soma vetorial.

III - Circuito RLC série

O circuito RLC série, como o aluno não ignora, é formado por uma indutância em série com uma resistência e uma capacitância. Na **figura 7**, apresentamos o circuito RLC série. A resistência de tal circuito pode ser a própria resistência ôhmica do fio da bobina.
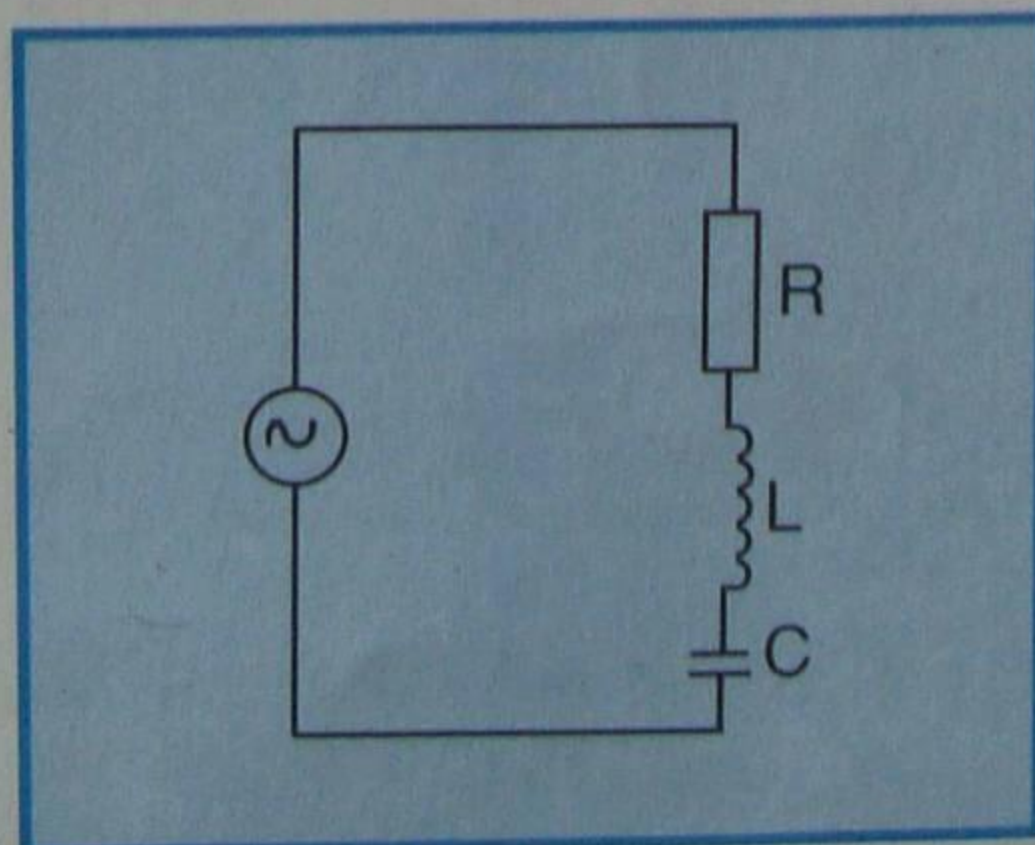
Figura 7 - Circuito RLC série.

Quando o circuito RLC é ligado a uma fonte de tensão variável, por ele circula corrente, cuja intensidade depende não só da resistência, mas também dos valores combinados das reatâncias. Estas, por sua vez, dependerão da freqüência da fonte.

A reatância indutiva, ou seja, a oposição que a bobina oferece à passagem da corrente alternada, é calculada pela expressão:

$$X_L = 6{,}28\ F\ L \quad \text{ou} \quad X_L = 2\pi F L$$

sendo: F a freqüência da fonte, em Hertz; L, a indutância da bobina, em Henryes; e 6,28 (2π), um número puro.

A reatância capacitiva que, como se sabe, é a dificuldade que o capacitor oferece à passagem da corrente alternada, é calculada pela fórmula:

$$X_C = \frac{1}{2\pi F C} \quad \text{ou} \quad X_C = \frac{1}{6{,}28 \times F \times C}$$

onde $2\pi = 6{,}28$ é um número puro; F, a freqüência da fonte em Hertz; e C, a capacitância em Farads.

A resistência ôhmica do circuito é a dificuldade que o resistor oferece à passagem da CA e se representa por R.

O aluno sabe, de aulas anteriores, e as expressões de X_L e X_C confirmam, que suas variações são inversas, ou seja, se a freqüência aumenta, cresce a oposição que a bobina oferece à passagem da corrente, mas diminui a oposição oferecida pelo capacitor.

a) Impedância

Ao efeito combinado das reatâncias e das resistências de um circuito, damos o nome de **impedância**. Podemos dizer, também, que impedância é a dificuldade que um circuito, contendo indutâncias, capacitâncias e resistências, oferece à passagem da corrente alternada. Representa-se a impedância pela letra **Z**.

Aplica-se a lei de Ohm, que estudamos em corrente contínua, aos circuitos de corrente alternada, substituindo-se a resistência R pela impedância Z. Daí as três fórmulas básicas:

$$V = Z \times I$$

$$I = V \div Z$$

$$Z = V \div I$$

onde V representa a tensão (Volts), I a intensidade da corrente (Ampères) e Z a impedância (Ohms), que, como já dissemos, equivaleria à resistência, no caso de circuitos de corrente contínua.

b) Cálculo da impedância

1º EXEMPLO: Quando o circuito tem apenas resistência, o valor da impedância coincide com o da resistência, ou seja:

$$Z = R$$

O cálculo da corrente é feito exatamente como em corrente contínua, ou seja, $I = V \div R$. Utilizamo-lo quando se pretende calcular a corrente que passa por um chuveiro, uma lâmpada, fogareiro e outros dispositivos constituídos eletricamente de apenas resistência (R), ou seja, que não possuam capacitância nem indutância.

Por exemplo, vamos determinar a corrente que passa por um chuveiro, cuja resistência é de 22 Ω, quando ligado em 220 V. Teremos:

$$I = V \div R = 220 \div 22 = 10 \text{ A}$$

O ângulo de fase, no caso, é 0°.

2º EXEMPLO: Quando o circuito tem apenas indutância, a impedância coincide com a reatância indutiva, isto é, $Z = X_L$. Para esta situação, a lei de Ohm fica:

$$V = X_L \cdot I$$

$$I = V \div X_L$$

$$X_L = V \div I$$

sendo que $X_L = 6{,}28$ FL.

Exemplo:

Calcular a corrente que passa por um indutor de 50 mH, ligado à rede de 110 V e 60 Hz.

Inicialmente, determinamos a impedância:

$$Z = X_L = 6{,}28 \times F \times L$$
ou
$$Z = 6{,}28 \times 60 \times 0{,}05 = 18{,}84 \ \Omega$$

Note que, para esta fórmula, admite-se a indutância em Henryes (H). A conversão de milihenryes (mH) em Henryes é feita simplesmente dividindo-se por 1 000 o valor dado em mH, no caso 50 mH. Daí, 50 ÷ 1 000 = 0,05 H.

A corrente será, portanto:

$$I = V \div X_L = 110 \div 18{,}84 \cong 5{,}8 \text{ A}$$

O ângulo de fase é de 90° em atraso com relação à tensão.

3º EXEMPLO: Se o circuito possui somente capacitância, a impedância coincide com a reatância capacitiva, ou seja, $Z = X_C$, e teremos:

$$V = X_C \cdot I$$

$$I = V \div X_C$$

$$X_C = V \div I$$

sendo que $X_C = \dfrac{1}{2\pi \ FC}$

Vamos calcular a corrente que passa por um capacitor de 0,1 µF, quando ligado à rede de 110 V e 60 Hz.

Inicialmente, calculamos a impedância. Teremos:

$$Z = \frac{1}{2\pi F C} = \frac{1}{6{,}28 \times 60 \times \dfrac{0{,}1}{1\,000\,000}}$$

$$Z = \frac{1\,000\,000}{6{,}28 \times 60 \times 0{,}1} = \frac{1\,000\,000}{6{,}28 \times 6}$$

$$Z = \frac{1\,000\,000}{37{,}68} \cong 26\,540 \ \Omega$$

Obs.: Dividindo 0,1 por 1 000 000, para transformar microfarads (µF) em Farads (F), pois esta (F) é a unidade requerida na fórmula acima.

Agora, calculamos a corrente. Será:

$$I = V \div X_L = 110 \div 26\,540$$

$$I \cong 0{,}0041 \text{ A}$$

O ângulo de fase entre tensão e corrente, no caso, é de 90° adiantado, isto é, a corrente está avançada em relação à tensão.

4º EXEMPLO: O circuito possui uma resistência em série com uma indutância.

Agora, a impedância é determinada pela fórmula:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

e o ângulo de fase pela expressão:

$$\cos \phi = \frac{R}{Z}$$

O aluno pode perceber que, agora, o problema começou a se complicar. De fato, a impedância é determinada pela raiz quadrada da soma de dois números (R e X_L) elevados ao quadrado, e o ângulo de defasagem, por uma função trigonométrica (cos ϕ lê-se: co-seno de fi). Aqueles que não sabem extrair raiz quadrada, e nem sabem utilizar uma tabela trigonométrica, poderão resolver o problema graficamente, da seguinte maneira (ver **figura 8**).
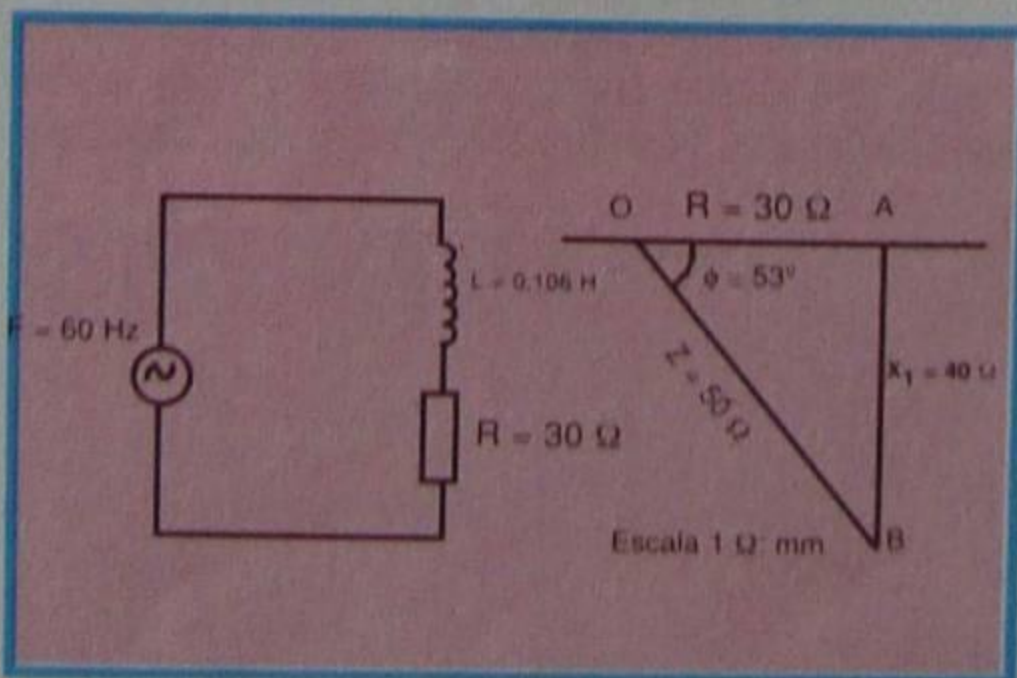
Figura 8 - Construção gráfica do circuito RL.

1 - Calcula-se X_L pela fórmula :

$$X_L = 6{,}28 \times F \times L$$

2 - Constrói-se um triângulo retângulo, tendo por base o valor de R e por altura o de X_L, em escala.

3 - Mede-se o valor da hipotenusa, o qual corresponderá ao valor da impedância que se procura.

4 - Com um transferidor, mede-se o ângulo entre a linha da resistência e da impedância, e tem-se o valor da defasagem.

Exemplo:

Vamos determinar a impedância de uma indutância de 0,106 H e de resistência igual a 30 Ω, ligada à rede de 110 V e 60 Hz.

Para resolver o problema graficamente, determinamos, de início, o valor da reatância indutiva. Será:

$$X_L = 6{,}28 \times F \times L$$
$$X_L = 6{,}28 \times 60 \times 0{,}106 = 39{,}94$$

que arredondaremos para 40 Ω.

A resistência ôhmica é de 30 Ω.

Agora, em um papel qualquer, traçamos uma reta horizontal e, sobre ela, com uma escala adequada, marcamos 30 Ω. Por exemplo, vamos escolher a escala de 1 Ω : mm. De um ponto O (origem) sobre a reta horizontal, marcamos o seguimento $\overline{OA}$ de 30 mm, que corresponde a 30 Ω.

Do ponto A, baixamos uma perpendicular à reta, e marcamos o seguimento $\overline{AB}$ de 40 mm correspondendo à reatância indutiva de 40 Ω.

Agora ligamos os pontos O e B, e medimos o comprimento do segmento $\overline{OB}$. O valor encontrado, convertido em Ohms, corresponde à impedância do circuito. Na figura 8, medimos $\overline{OB}$ = 50 mm. Como cada milímetro representa um Ohm, segue-se que:

$$Z = \overline{OB} = 50 \ \Omega$$

Com um transferidor, medimos o ângulo entre os segmentos $\overline{OA}$ e $\overline{OB}$, e encontramos 53°, aproximadamente; logo, o ângulo de fase é:

$$\phi = 53°$$

O triângulo OAB é chamado de **triângulo da impedância**.

Se resolvêssemos o problema algebricamente, encontraríamos:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L{}^2} = \sqrt{(30)^2 + (40)^2}$$

$$Z = \sqrt{900 + 1\,600} = \sqrt{2.500}$$

$$Z = 50 \ \Omega$$

Para a determinação do ângulo de fase, aplicamos a fórmula:

$$\cos \phi = \frac{R}{Z}$$

Teremos:

$$\cos \phi = \frac{30}{50} = 0{,}60$$

Agora, consultando uma tabela de trigonometria, leremos que ϕ = 53°.

Fica, assim, resolvido o problema algebricamente.

O aluno pode perceber que o método gráfico é rápido, fácil e será tanto mais preciso, quanto maior for a escala escolhida.

5º EXEMPLO: O circuito possui resistência e capacitância.

Nestas condições, a impedância será determinada pela expressão:

$$Z= \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

e o ângulo de fase por:

$$\cos \phi = \frac{R}{Z}$$

O cálculo da impedância e a determinação do ângulo de fase, também, podem ser resolvidos graficamente, de maneira análoga à explicada no exemplo anterior, ou seja, construímos o triângulo da impedância e lemos Z e ϕ. A única diferença do caso anterior é que o valor de X_C deve ser marcado para **cima** da reta. Isto é lógico, porque a defasagem produzida pelo capacitor é **contrária** àquela provocada pelo indutor.

A título de exercício, vamos calcular a impedância e o ângulo de defasagem de um circuito, contendo um capacitor de 330 µF ligado em série com um resistor de 6 Ω na rede de 60 Hz.

Soluções:

1ª) Solução pelo método gráfico

Inicialmente, calculamos a reatância capacitiva pela fórmula:

$$X_C = \frac{1}{2 \pi . F. C}$$

Substituindo 2 π por 6,28, F por 60 Hz e C por 330 µF, ou 330 ÷ 1.000.000 F, resulta:

$$X_C = \frac{1}{6,28 \times 60 \times \frac{330}{1.000.000}}$$

$$X_C = \frac{1\ 000\ 000}{6,28 \times 60 \times 330} = \frac{1\ 000\ 000}{124\ 344}$$

$$X_C \cong 8\ \Omega$$

Agora, fazemos a construção geométrica semelhante à do exercício anterior. Assim, sobre uma reta horizontal, marcamos, a partir de um ponto **O**, um segmento OA, representando a resistência R de 6 Ω. Vamos escolher a escala de 5 mm: Ω; portanto, para marcar 6 Ω, utilizaremos o segmento de 6 x 5 = 30 mm, ou 3 cm, como mostrado na **figura 9**. A seguir, traçamos uma perpendicular pelo ponto **A** e marcamos o segmento AB, correspondente a X_C = 8 Ω acima da horizontal (segundo a escala escolhida, esse segmento deve ter 4 cm). Ligamos o ponto **O** ao ponto **B**, e temos o triângulo
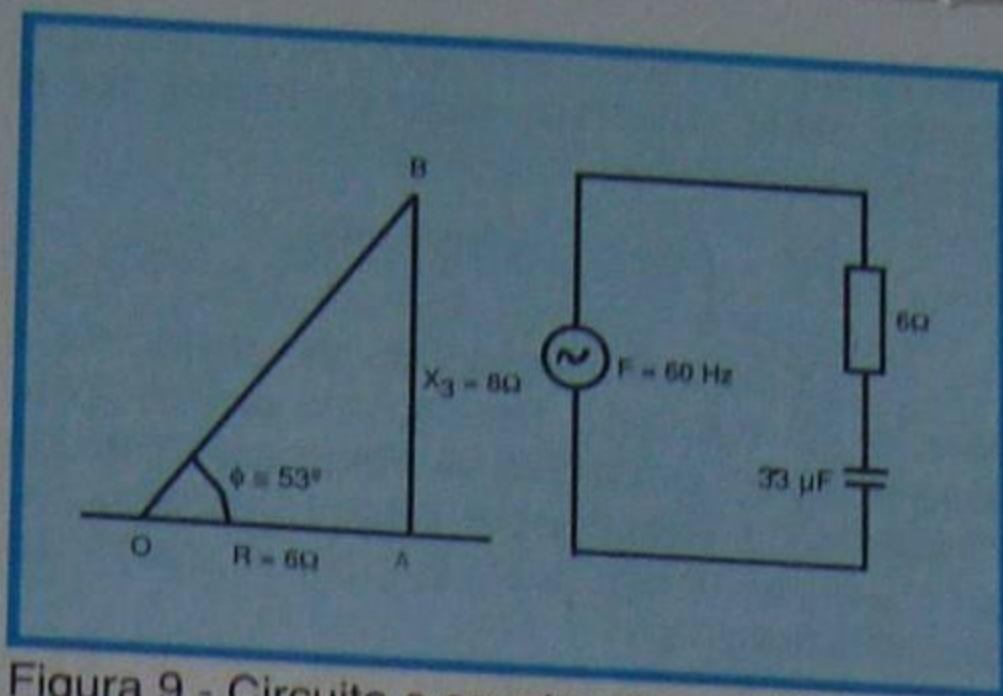
Figura 9 - Circuito e construção gráfica.

da impedância. O segmento $\overline{OB}$ representa a impedância que procuramos.

Medindo esse segmento, encontramos $\overline{OB}$ = 5 cm, ou 50 mm. Como a escala adotada é de 5 mm por Ω, segue-se que o valor de Z é:

$$Z = \frac{50}{5} = 10\ \Omega$$

Com o transferidor, medimos o ângulo formado pelos segmentos $\overline{OA}$ e OB, e encontramos que ϕ = 53°.

Obs.: O ângulo de fase, deste exemplo e do anterior, é o mesmo: entretanto, trata-se de simples coincidência, explicável pela semelhança dos dois triângulos de impedância. Se as reatâncias e resistências não fossem proporcionais, os ângulos teriam valores distintos, que é o caso mais comum, na prática.

2ª) Solução pelo método algébrico

Aplicando a fórmula teremos:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$$

$$Z = \sqrt{6^2 + 8^2}$$

$$Z = \sqrt{36 + 64}$$

$$Z = \sqrt{100}$$

$$Z = 10\ \Omega$$

O ângulo de fase seria:

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{6}{10} = 0,6$$

Consultando uma tabela de cosenos, encontramos:

ϕ = 53°, aproximadamente.

6º EXEMPLO: O circuito possui resistência, capacitância e indutância.

Trata-se, portanto, do caso específico do circuito RLC série, uma vez que os das figuras 8 e 9 correspondem ao RL e RC, respectivamente.

Para o circuito RLC série, a impedância é calculada pela expressão:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

e o ângulo de fase por:

$$\cos \phi = \frac{R}{Z}$$

A determinação gráfica desses elementos é bastante semelhante à que vimos anteriormente, e o exemplo que daremos a seguir certamente esclarecerá as dúvidas que porventura ainda existam.

Consideremos o circuito da **figura 10**, onde C = 0,2 µF, R = 100 Ω e L = 100 mH, e determinemos a impedância e o ângulo de fase desse circuito, quando ligado a uma fonte de 1 000 Hz.
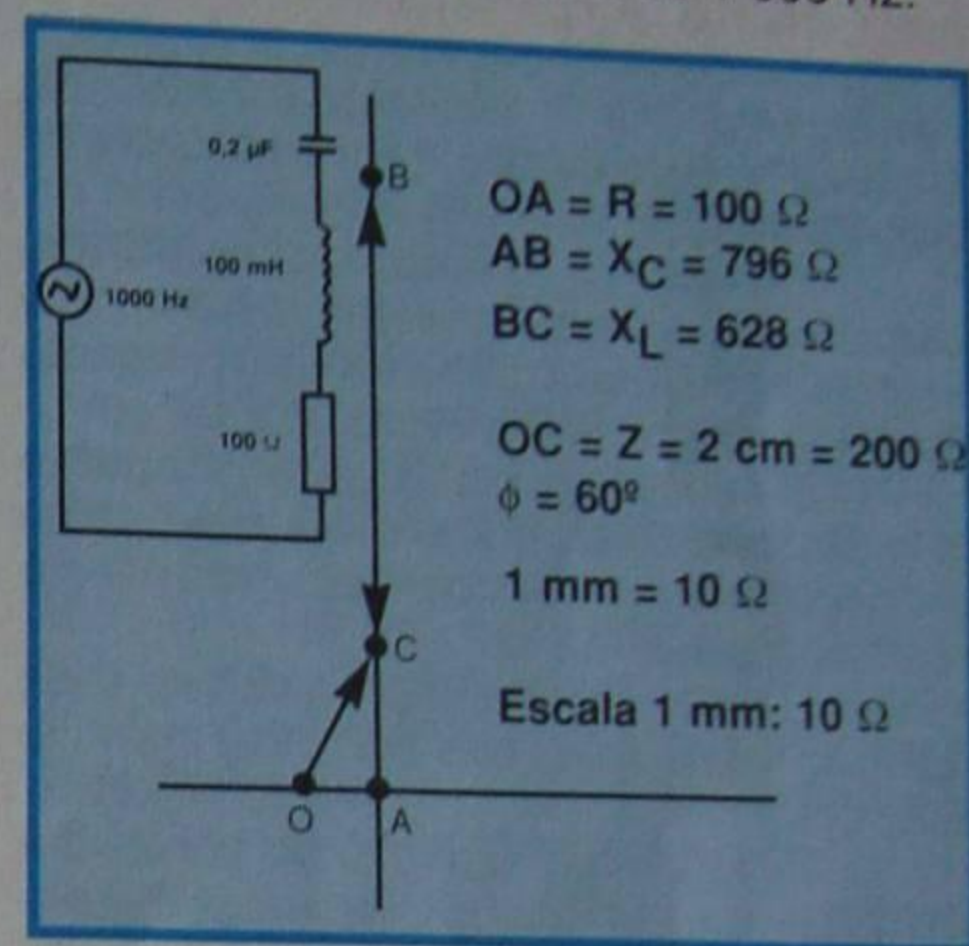
Figura 10 - Circuito e construção gráfica do RLC série.

Resolvamos a questão pelos dois processos:

1º) Método gráfico

De início, devemos calcular as reatâncias, tanto indutiva como capacitiva, na freqüência da fonte.

Teremos:

a) $X_L = 6,28 \times F \times L = 6,28 \times 1\ 000 \times \frac{100}{1\ 000}$

$$X_L = 628\Omega$$

Note que dividimos 100 por 1 000, para transformar mH em H.

b) $X_C = \frac{1}{6,28 \times F \times C}$

$$Xc = \frac{1}{6,28 \times 1000 \times \frac{0,2}{1\ 000\ 000}}$$

$$X_C = \frac{10\ 000}{12,56} \cong 796\ \Omega$$

A seguir, fazemos a construção do triângulo da impedância, do seguinte modo:

1º) Traçamos a reta horizontal e, sobre ela, escolhemos o ponto de origem **O**.

2º) Escolhemos a escala. Neste ponto, devemos fazer um exame na ordem de grandeza (valores) das

reatâncias e resistências, para escolher uma escala que dê alguma precisão, mas que não conduza a um desenho exageradamente grande.

Em nosso exemplo, vemos que o maior valor a ser marcado é 796 Ω; portanto, podemos adotar a escala de 1 mm:10 Ω.

3º) Uma vez adotada a escala, marcamos, a partir do ponto O, e sobre a reta horizontal, o valor da resistência. Como a resistência é de 100 Ω e cada milímetro de desenho representa 10 Ω, o segmento OA da figura 10 terá 10 mm (1 cm).

4º) Agora, escolhemos a reatância maior, e marcamo-la sobre a perpendicular à reta horizontal, passando pelo ponto **A**. A convenção a ser adotada é aquela que utilizamos na construção das figuras 8 e 9, ou seja, a reatância indutiva no lado de baixo e a capacitiva no lado de cima.

Como, no exemplo, a reatância capacitiva é a de maior valor, marcamos o segmento $\overline{AB}$ para cima. O comprimento de $\overline{AB}$ deve ser de 79,6 mm ou 7,96 cm.

5º) Em seguida, a partir do ponto **B**, e em sentido contrário a $\overline{AB}$, marcamos o segmento $\overline{BC}$ correspondente à reatância indutiva,

O valor da reatância indutiva é de 628 Ω; logo, $\overline{BC}$ deve ter 62,8 mm ou 6,28 cm.

6º) Unimos o ponto O ao ponto C e medimos o segmento $\overline{OC}$, que corresponde à impedância do circuito. Na figura 10, encontramos $\overline{OC}$ = 2 cm, aproximadamente. Como 2 cm = 20 mm, e cada milímetro representa 10 Ω, segue-se que:

$$Z = 20 \times 10 = 200\ \Omega$$

7º) Finalmente, utilizando um transferidor, medimos o ângulo formado por $\overline{OA}$ e $\overline{OC}$, encontrando que $\phi = 60°$.

2º) Método analítico

Resolvendo a questão pelo método algébrico, encontramos:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

$$R = 100\ \Omega$$

Onde:

$$X_L - X_C = 628 - 796 = -168$$

Logo:

$$Z = \sqrt{(100)^2 + (-168)^2}$$

$$Z = \sqrt{10\,000 + 28\,224}$$

$$Z = \sqrt{38\,224}$$

$$Z \cong 195{,}5\ \Omega$$

Para a defasagem, encontramos:

$$\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{100}{195{,}5} = 0{,}511$$

Consultando a tabela de cos-senos, encontramos que $\phi = 59°14'$.

O aluno deve observar que a solução gráfica apresenta resultado bastante aproximado do verdadeiro, e tanto mais preciso, quanto maior for a escala escolhida.

IV - Ressonância

O conceito físico de ressonância o aluno já adquiriu em aulas anteriores. Nesta lição especial, vamos abordar os tópicos de interesse em radiotécnica, exclusivamente sob o ponto de vista quantitativo.

Iniciemos observando os circuitos RL e RC, como os das figuras 8 e 9, por exemplo. Verifiquemos o modo de variação da impedância e, conseqüentemente, da corrente, quando varia a freqüência da fonte.

a) Circuito RL

Neste circuito, a impedância e a corrente podem ser definidos pelas expressões:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$I = V \div Z$$

É fácil observar que, ao **aumentar a freqüência da fonte, ou a indutância da bobina, a impedância também aumenta e, conseqüentemente, a corrente diminui.** Suponhamos que, no circuito da figura 8, a freqüência seja variável, mas a tensão do gerador permaneça constante, Para **f = 0 Hz** (corrente contínua), a reatância é nula e a corrente fica limitada somente pela resistência, ou seja: I = V ÷ R; se **V = 110 V:**

$$I = 110 \div 30 = 3{,}66\ A$$

Para f = 30 Hz, a reatância será de:

$$X_L = 6{,}28 \times 30 \times 0{,}106 \cong 20\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{30^2 + 20^2} = \sqrt{1\,300} \cong 36\ \Omega$$

$$I = 110 \div 36 = 3{,}05\ A$$

Para f = 60 Hz já calculamos Z = 50 Ω; logo:

$$I = \frac{110}{50} = 2{,}2\ A$$

Para f = 120 Hz:

$$X_L = 6{,}28 \times 120 \times 0{,}106 \cong 80\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{30^2 + 80^2} = \sqrt{7\,300} = 85{,}4\Omega$$

$$I = \frac{110}{85{,}4} = 1{,}28\ A$$

Desse modo, podemos calcular a corrente para qualquer freqüência. Agora, construindo um gráfico da **corrente** em função da **freqüência**, encontramos uma curva semelhante com a ilustrada na **figura 11**.

Essa figura mostra, em gráfico, que a corrente no circuito diminui rapidamente com o aumento da freqüência.
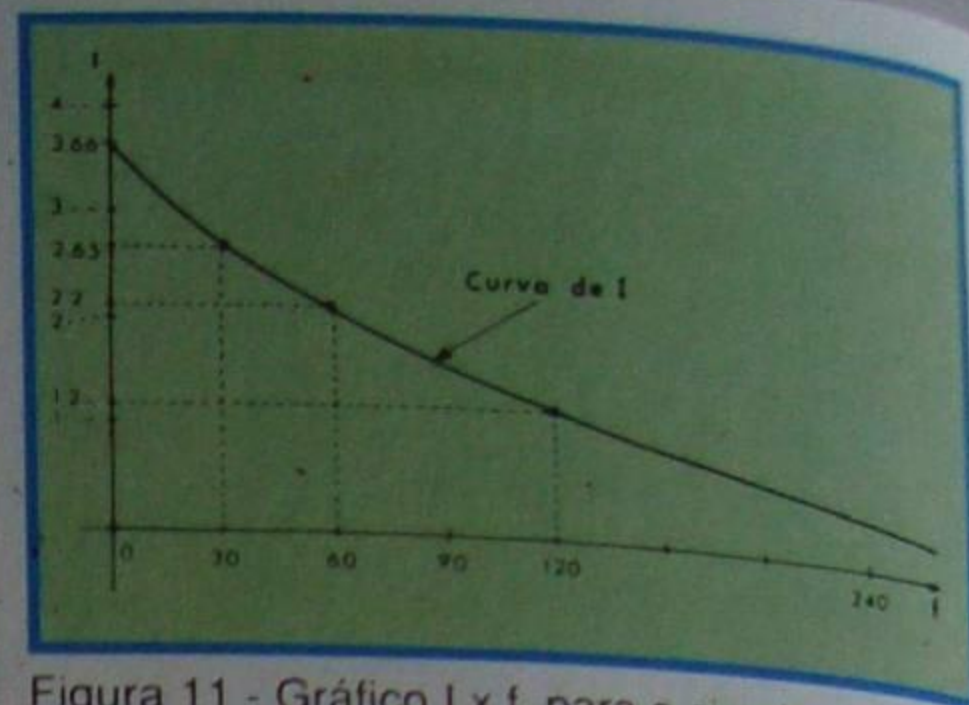
Figura 11 - Gráfico I x f, para o circuito RL.

b) Circuito RC

Consideremos o circuito RC, como o mostrado na figura 9, por exemplo, e admitamos, para ele, raciocínio semelhante ao anterior, ou seja, que a tensão seja constante de 110 V e que a freqüência seja variável.

Não vamos fazer cálculos, mas podemos concluir, imediatamente que para freqüência nula, f = 0 Hz, a corrente é também nula, e para freqüência muito grande, a reatância é nula e a corrente igual a:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{110}{6} = 18{,}3\ A$$

Se construirmos um gráfico da variação da corrente com a freqüência, encontraremos uma curva semelhante a mostrada na **figura 12**.
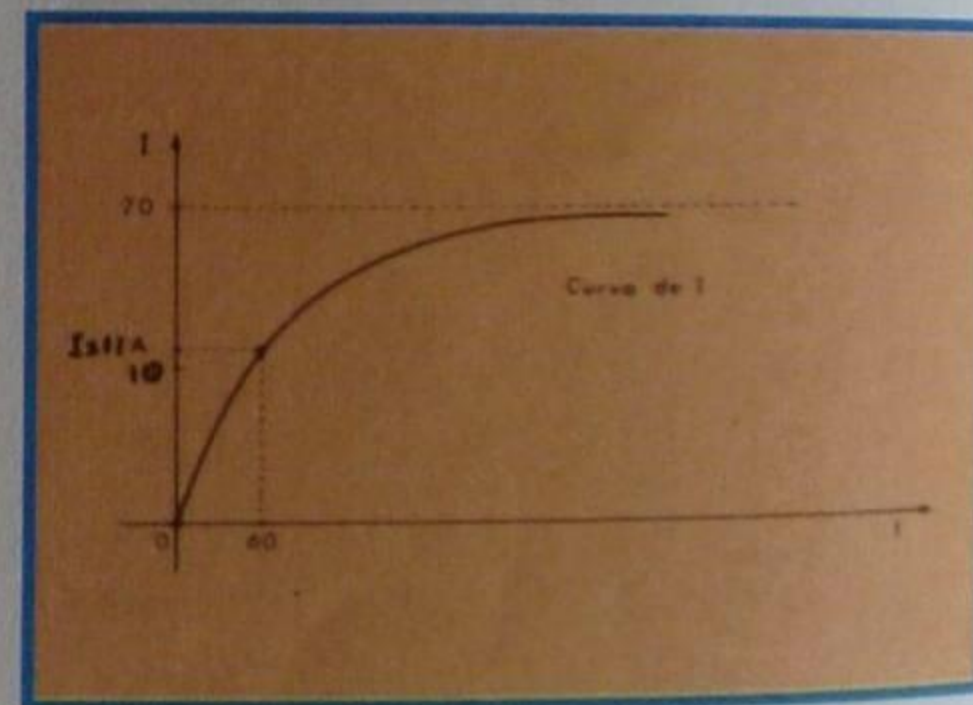
Figura 12 - Gráfico I x f, para circuito RC.

Como o aluno nota, as duas curvas variam inversamente, como era de se esperar. Mostramo-las com alguns detalhes, porque elas terão interesse, quando formos estudar os corretores de tom.

c) Circuito RLC

No circuito RLC existem dois componentes, cuja reatância varia com a freqüência. Essa variação se processa de maneira inversa nos componentes, ou seja, enquanto a reatância indutiva aumenta linearmente com a freqüência, a reatância capacitiva diminui, embora não linearmente.

Não é difícil entender que no circuito RLC série, cuja freqüência da fonte varia, existe uma freqüência para a qual a reatância indutiva se iguala à reatância capacitiva. Essa freqüência é chamada de **freqüência de ressonância** do circuito.

Quando acontece a ressonância, o circuito apresenta uma série de propriedades importantes, sendo de maior interesse, para nosso curso, as seguintes:

1ª) Impedância

A fórmula geral da impedância é:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

na ressonância $X_L = X_C$, logo, a diferença é nula e a impedância fica:

$$Z = \sqrt{R^2} \quad \text{ou} \quad Z = R$$

Isto mostra que a corrente no circuito fica determinada, exclusivamente, pelo valor da resistência, pois vimos que $I = V \div Z$, e como $Z = R$, $I = V \div R$. Nos circuitos de rádio, a resistência, geralmente, é a própria do indutor, resultando daí o interesse em se obter bobina com baixa resistência, para se conseguir a maior corrente possível.

2ª) Ângulo de defasagem

Na ressonância, o ângulo de fase é nulo. De fato, sendo iguais as reatâncias, a corrente é determinada pela resistência, e sabemos que defasagem entre tensão e corrente, na resistência, é nula, ou seja, tensão e corrente estão em fase.

As duas propriedades citadas, isto é, $Z = R$ e $\phi = 0°$, podem ser visualizadas, construindo-se graficamente o triângulo da impedância, pelo processo que descrevemos, anteriormente.

Na **figura 13** repetimo-lo, genericamente. Note que, por ser $X_L = X_C$, o segmento AB é igual ao BC e, portanto, o ponto A coincide com o ponto C. A impedância é dada pelo segmento $\overline{OC}$, que coincide com $\overline{OA}$, que é o valor da resistência. É claro que o ângulo formado por OA e $\overline{OC}$ é nulo, pois esses segmentos coincidem.
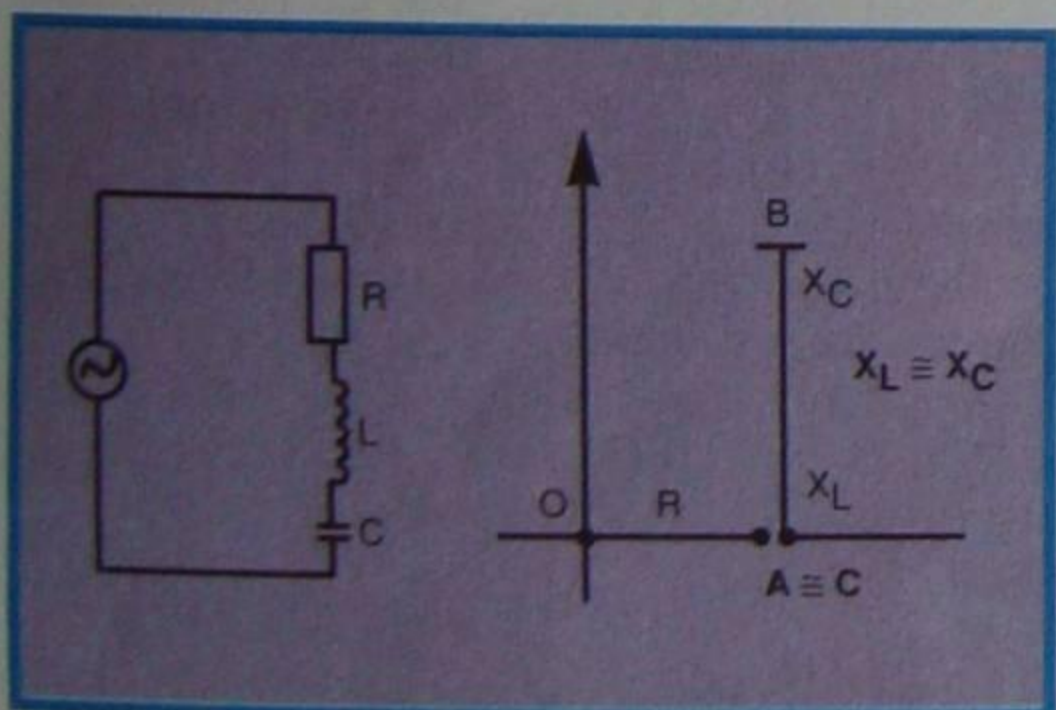
Figura 13 - Circuito RLC genérico e gráfico.

3ª) Freqüência de ressonância

Como X_L é igual a X_C na ressonância, podemos escrever:

$$6{,}28.F.L = \frac{1}{6{,}28.F.C}$$

ou:

$$F^2 = \frac{1}{(6{,}28)^2 .LC}$$

Extraindo a raiz quadrada, fica:

$$F = \frac{1}{\sqrt{(6{,}28)^2\ LC}}$$

$$F = \frac{1}{6{,}28\ \sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\ \sqrt{LC}}$$

que é a conhecidíssima fórmula de **Thompson**, que apresentamos em outra parte do curso.

Essa é a freqüência própria de ressonância do circuito. Quando a freqüência da fonte de sinal coincide com a freqüência própria do circuito acontece a ressonância. Nos circuitos de entrada de receptores de rádio e televisão, obriga-se a que a freqüência do circuito ressonante coincida com a freqüência da fonte (antena), modificando-se o valor de L ou de C. O aluno sabe que a antena recebe centenas de sinais de freqüências diferentes. Se ligarmos a ela um circuito RLC série, esses sinais se transferirão para o circuito. O sinal, cuja freqüência coincide com a de ressonância do circuito, provocará a maior corrente e, conseqüentemente, a maior tensão; diz-se que o circuito seleciona esse sinal. Quanto mais alto o valor da corrente, mais seletivo é o circuito.

Para selecionar outro sinal, devemos modificar o circuito, de modo que ele apresente outra freqüência própria de ressonância. Isto é feito variando-se o valor de C ou de L. Em recepção de rádio, é mais comum variar-se o valor de C, adotando, para isso, um capacitor variável. Em recepção de TV, varia-se, quase que exclusivamente, o valor de L.

Se para um circuito RLC série traçarmos a curva da variação de corrente com a mudança de freqüência, encontraremos uma figura como a mostrada na **figura 14**. Na freqüência f_o de ressonância, a corrente tem seu maior valor.
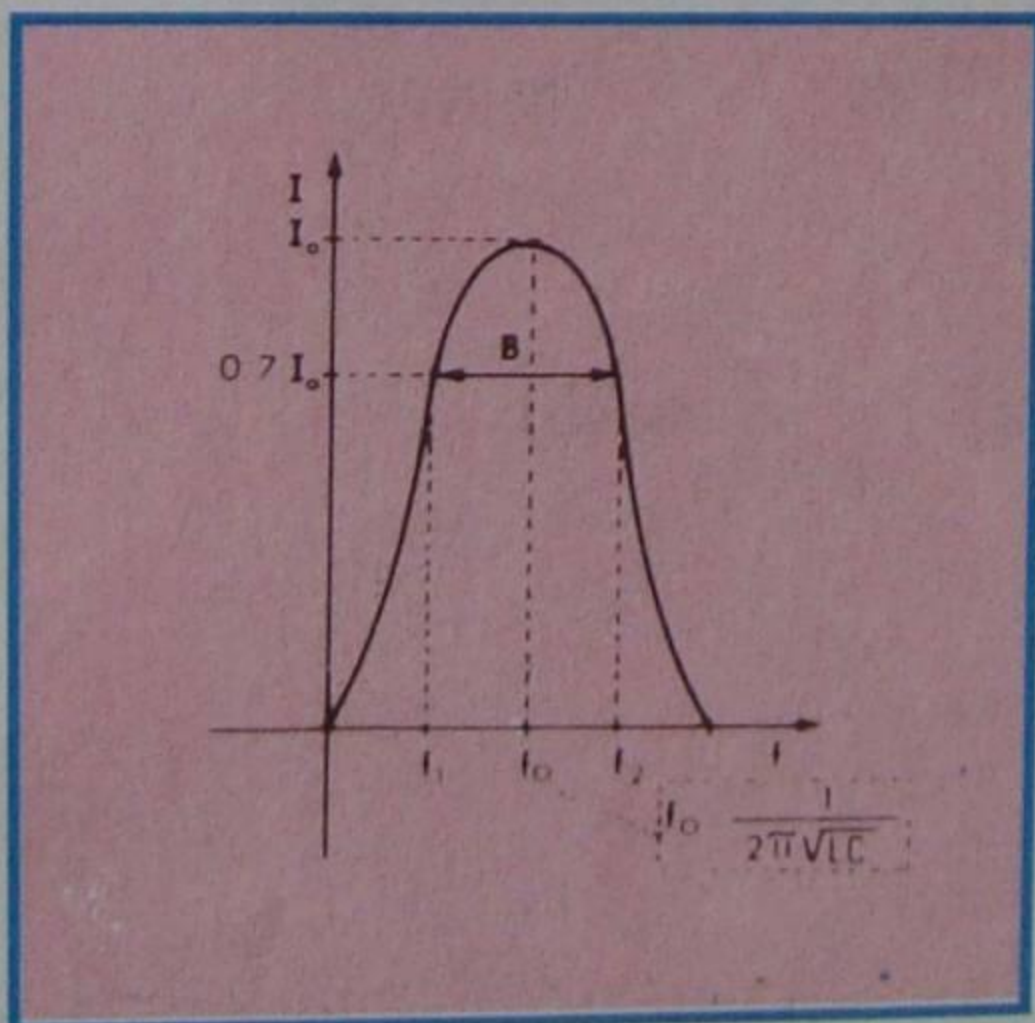
Figura 14 - Curva do circuito ressonante RLC série.

4ª) Banda passante

Por definição, a banda passante de um circuito ressonante RLC série é o intervalo de freqüência, dentro do qual a corrente **não** cai a valores menores que 0,707 (igual a $\sqrt{2} \div 2$) da corrente de ressonância. As freqüências-limites da banda passante são chamadas de **freqüências quadrantais** ou **freqüências de quadratura** e também **freqüência de corte** do circuito.

Nas freqüências de corte, a potência consumida pelo circuito corresponde à metade da potência máxima, por isso se costuma dizer, também, que a **freqüência de corte** é aquela de **meia potência**. Na figura 14, indicamos por f_1 e f_2 as freqüências de corte e por **B** a banda passante.

Na seleção de estações, a banda passante é um dado bastante importante. Se ela for **estreita**, o circuito será **bastante** seletivo. Se for **larga**, o circuito será **pouco** seletivo. A seletividade do circuito está intimamente ligada ao fator de mérito **Q** da bobina.

Nas freqüências de corte, o ângulo de fase entre tensão e corrente é de 45°, sendo que a corrente está **adiantada** para a **freqüência superior** e **atrasada** para **inferior**.

5ª) Coeficiente de seletividade

Vimos que, na ressonância, a impedância do circuito RLC série é mínima e, conseqüentemente, a corrente é máxima. Para qualquer outra freqüência diferente da de ressonância, a corrente também terá valor diferente do máximo. Pode-se, então, medir a seletividade do circuito, pela relação entre a corrente máxima, que chamamos de I_o, e a corrente I, para uma freqüência qualquer. A essa relação dá-se o nome de **coeficiente de seletividade**. Chamando-a de **s**, podemos escrever:

$$s = \frac{I_o}{I}$$

Levando em consideração o Q do circuito, a variação de freqüência que chamamos Δf, e a freqüência de ressonância f_o, podemos escrever:

$$s = \sqrt{1 + 4\,Q^2 \left(\frac{\Delta f}{f_o}\right)^2}$$

Desta fórmula resulta outra de larga aplicação prática, porque permite determinar, rapidamente, a banda passante, conhecendo-se o Q e a freqüência de ressonância, e, inversamente, o valor de Q, para se obter uma banda passante estipulada. De fato, vimos que para as freqüências de definição da banda passante $I = 0{,}707\ I_o$, ou:

$$I = I_o \div \sqrt{2}$$

Logo:

$$s = \frac{I_o}{I} = \sqrt{2} = \sqrt{1 + 4\,Q^2\ \frac{\Delta f^2}{f_o^2}}$$

Daqui resulta:

$$\sqrt{1} = \sqrt{Q^2 x\ 4\ \frac{\Delta f^2}{f_o^2}} \quad \text{ou} \quad 1 = \frac{2\Delta f}{f_o} Q$$

Como 2 Δf é a banda passante B, vem:

$$Q = \frac{f_o}{B} \quad \text{ou} \quad B = \frac{f_o}{Q}$$

Estas expressões, principalmente a última, mostram a dependência entre a banda passante e o Q do circuito. Para uma dada freqüência de ressonância, quanto maior o Q, menor será a banda passante.

Exemplo:

Calculemos a banda passante de dois circuitos, sintonizados em 1 MHz, sendo que um tem Q de 100, e outro de 160:

Para Q de 100, temos:

$$B = \frac{1\,000\,000}{100} = 10\,000 \text{ Hz}$$

Para Q de 160, vem:

$$B = \frac{1\,000\,000}{160} = 6\,250 \text{ Hz}$$

Conclui-se, deste exemplo, que um Q de 160 seria inadequado para a recepção da informação de música das emissoras de rádio, porque seriam perdidas as freqüências altas, ou seja, acima de 3 125 Hz (6 250 ÷ 2). Por outro lado, se se tratasse de um receptor para radioamadores, onde o que interessa é a seletividade e a clareza da palavra, a bobina de Q = 160 seria mais interessante.

6ª) Importância do Q

O exemplo anterior mostrou a influência do Q na banda passante. Mas não é apenas essa.

De fato, suponhamos um circuito RLC em ressonância. Sabemos que a corrente, nessa situação, vale:

$$I = \frac{V}{R}$$

onde V é a tensão aplicada ao circuito e R, a resistência ôhmica do circuito.

A tensão, nos terminais da bobina, seria:

$$V_L = X_L \times I$$

Substituindo o valor da corrente vem:

$$V_L = \frac{X_L \times V}{R}$$

Mas X_L/R é, por definição, o Q do circuito; logo, podemos escrever:

$$V_L = V \times Q$$

Esta expressão mostra que a tensão, nos terminais da bobina, é Q vezes maior que a tensão da fonte; **isto na ressonância**. Por essa razão, o Q também costuma ser chamado **coeficiente de sobretensão**.

Observe que, na ressonância, a tensão do capacitor é igual a do indutor; logo:

$V_C = V \cdot Q$, também

Na ressonância, o Q do circuito pode ser calculado por:

$$Q = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$$

onde R é a resistência ôhmica, L a indutância e C a capacitância.

Esta fórmula é mais prática do que a de definição, porque geralmente, se conhecem os valores dos componentes, e não a freqüência. É claro que a freqüência de ressonância depende dos valores de L e C, e pode ser calculada pela fórmula de Thompson. A vantagem da expressão que acabamos de dar é que ela evita esse trabalho.

Exemplo:

Vamos determinar o Q de uma bobina, na **freqüência de ressonância**, onde L = 100 μH, C = 100 pF e R = 10 Ω.

Teremos:

$$Q = \frac{1}{10}\sqrt{\frac{\frac{100}{1\,000\,000}}{\frac{100}{1\,000\,000\,000\,000}}}$$

$$Q = \frac{1}{10}\sqrt{\frac{10\,000\,000\,000}{10\,000}}$$

$$Q = \frac{1}{10}\sqrt{1\,000\,000}$$

$$Q = \frac{1000}{10}$$

$$Q = 100$$

Para usar a fórmula de definição:

$$Q = \frac{6{,}28 \times F \times L}{R}$$

teríamos, inicialmente, de calcular a freqüência de ressonância:
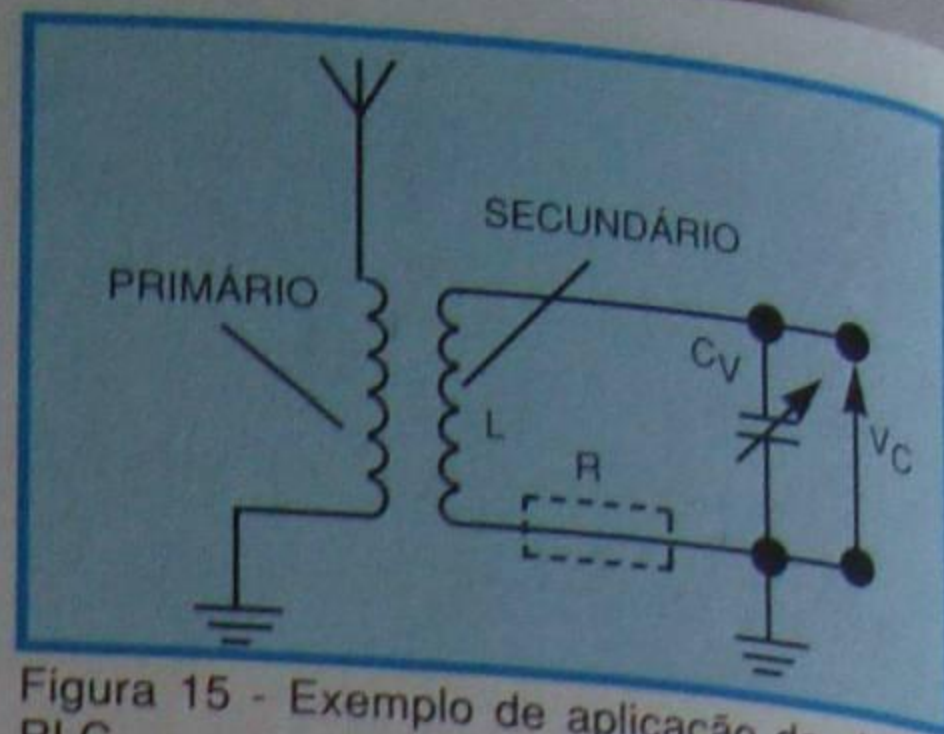
Figura 15 - Exemplo de aplicação do circuito RLC.

$$F = \frac{1}{6{,}28\ L \cdot C}$$

para depois usar a fórmula:

$$Q = \frac{6{,}28 \times F \times L}{R}$$

É claro que o resultado seria o mesmo, mas o trabalho é maior.

Para encerrar esta aula, apresentamos, na **figura 15**, um exemplo de aplicação prática de um circuito RLC. Trata-se da bobina de antena de um receptor de rádio.

As ondas de rádio chegam ao primário através da antena, com as mais variadas freqüências. Esse primário corresponde, portanto, a uma fonte de freqüência variável, como as que consideramos desde o início desta lição. Essa fonte está ligada ao circuito RLC (secundário) por indução eletromagnética. Variando-se a capacitância de C_V, que normalmente é um capacitor variável, obrigamos o circuito RLC a entrar em ressonância com uma das freqüências da fonte, ou seja, com uma das emissoras recebidas pela antena. Para essa emissora, a tensão V_C, recolhida nos terminais de C_V (ou de L), é Q vezes maior do que a recebida pela antena. Essa tensão, depois, será amplificada, detetada e convertida em som.

Por exemplo, suponha o aluno que a emissora seja recebida na antena com tensão de 5 μV. Se o Q do circuito é 100 e o acoplamento entre primário e secundário bastante forte, a tensão recolhida no capacitor C_V será de:

$$V_C = 100 \times 5\ \mu V = 500\ \mu V$$

É de se notar que as outras freqüências que atingem a antena também induzirão tensão no circuito RLC, mas essa tensão será tanto menor, quanto mais distanciada estiver da freqüência de ressonância, e tanto mais alto for o Q do circuito.

Na próxima lição especial continuaremos o assunto, apresentando o circuito RLC paralelo, também de uso freqüente em radiotécnica.